

На правах рукописи

Саттарова Улькар Эльдар кызы

**РАЗРАБОТКА ГИБРИДНЫХ NOISE ТЕХНОЛОГИЙ
ФОРМИРОВАНИЯ РОБАСТНЫХ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ
МАТРИЦ ЗАШУМЛЕННЫХ СИГНАЛОВ
МНОГОМЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

1203.01 – Компьютерные науки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени доктора
технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук,
профессор, академик Тельман Алиев

БАКУ – 2018

Работа выполнена в Институте Систем Управления НАН
Азербайджана

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, проф. член-корр. НАНА Садыгов А.Б.

доктор технических наук, проф. член-корр. НАНА Алигулиев Р.М.

доктор технических наук, проф. Гасымов В.А.

Ведущая организация: кафедра «Информационные технологии и
программирование» Бакинского Государственного Университета

Защита диссертации состоится **7 декабря 2018 г. в 15.00** на
заседании диссертационного совета D01.121 при Институте
систем управления НАН Азербайджана по адресу: AZ1141, Баку,
ул. Б.Вахабзаде, 9.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке
Института Систем Управления НАН Азербайджана.

Автореферат разослан 30 октября 2018 года.

**Учёный секретарь диссертационного
совета D01.121, к.ф.м.н., доцент**

А.Б. Пашаев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Для описания реальных случайных процессов, являющихся многомерными и имеющих много входов и выходов, используются статистические характеристики. Примерами этого являются объекты нефтедобывающей отрасли, энергетической и химических отраслей, различные строительные объекты, средства транспорта и т.д.

В большинстве случаев сигналы, полученные различными сенсорами от указанных объектов, содержат помехи, которые накладываются на полезные сигналы. При этом одной из главных задач, требующей решения в системах мониторинга и управления, является задача правильного определения статистических характеристик, так как нарушение адекватности их подсчетов приводит к ошибочности дальнейших расчетов и неэффективности использования ресурсов на мониторинг. Следует также отметить, что статистические характеристики являются основными параметрами при формировании корреляционных матричных уравнений. В начале перехода объекта в аварийное состояние статистические характеристики резко меняются, так как доля помехи в них возрастает. Таким образом, корреляционные матрицы вычисляются с ощутимыми погрешностями, а их нормирование не приводит к решению данной проблемы, а приводит к изменению всех характеристик этих матриц, и во многом является причиной неадекватности результатов решения матричных уравнений.

Это же, в свою очередь, приводит к обнаружению изменения технического состояния объекта на стадии, повлекшей за собой серьезные, а порой и непоправимые последствия.

В работе предложена технология формирования скорректированных нормированных корреляционных матриц матричных уравнений многомерных стохастических объектов как при наличии корреляции между полезным сигналом и помехой, так и при ее отсутствии. Благодаря этому появляется возможность обеспечить адекватность контроля текущего состояния объекта, несмотря на несоблюдение условий, предъявляемых при построении математической модели.

Надежды на возможность устранения влияния погрешности от помехи на окончательный результат путем фильтрации помехи не оправдались, так как зачастую именно высокочастотные составляющие спектра сигнала являются носителем диагностической информации. И часть ценной, диагностической информации теряется. Таким образом, в настоящих системах контроля не заложены возможности мониторинга технического состояния технологического объекта при помощи подсчета адекватных статистических характеристик и построения множеств корректного подсчета корреляционных матриц.

В связи с этим необходимо решить данную проблему путем создания инновационных алгоритмов, технологий и современных программных средств формирования нормированных корреляционных матриц зашумленных сигналов с элементами, эквивалентными элементам корреляционных матриц, полезных сигналов. С этой точки зрения тема данной диссертационной работы является актуальной.

Цель работы. Целью диссертации является создание новых гибридных noise технологий формирования робастных (корректированных) корреляционных матриц зашумленных сигналов эквивалентных матрицам полезных сигналов.

Объектами исследования данной диссертационной работы являются системы контроля и управления объектов нефтедобывающей отрасли, энергетической и химических отраслей, различных строительных объектов, средствах транспорта и т.д.

Методика исследования. Проведенные в диссертационной работе исследования базируются на вероятностно-статистических методах, методах корреляционного анализа, теории идентификации, методах и принципах информационных технологий, методах вычислительной математики и оптимизации, а также на многочисленных вычислительных и натурных экспериментах.

Научная новизна проведенных исследований и полученных в работе результатов заключается в следующем:
– показана необходимость создания новых методов, алгоритмов и технологий обеспечения адекватности решения матричных уравнений;

– проверке эффективности предложенных алгоритмов с помощью вычислительных экспериментов средствами компьютерной математики Matlab;

– разработке алгоритмов, технологий и новых программных средств, позволяющих получить нормированные корреляционные матрицы эквивалентные матрицам полезных сигналов, даже при нарушении классических условий. Программный продукт позволяет проводить сравнительный анализ скорректированных нормированных корреляционных матриц зашумленных сигналов с нормированными корреляционными матрицами зашумленных сигналов, вычисленными по традиционной технологии, а также корреляционными матрицами полезного сигнала;

– разработке программного обеспечения, позволяющего получить скорректированные статистические характеристики для формирования нормированных корреляционных матриц зашумленных сигналов, используемых при мониторинге технического состояния, эксплуатации крупного строительного объекта;

– проведение натурных экспериментов, т.е. проверка возможности применения данных технологий на эксплуатируемом мосту и создание специальной программы, проводящей мониторинг технического состояния исследуемого объекта в режиме реального времени и осуществляющая непрерывные подсчеты оценок различных статистических характеристик. А также программный продукт, позволяет проведение сравнительного анализа скорректированных оценок со стандартными оценками статистических характеристик и их наглядную визуализацию; эффективность разработанных алгоритмов подтверждена результатами вычислительных и экспериментальных исследований и результатами внедрения в различных областях промышленности.

Личный вклад соискателя. Основные результаты, выносимые соискателем на защиту настоящей диссертационной работы, получены им лично.

Практическая значимость и реализация результатов работы.

1. Разработанные методы также проверялись автором в одной из лучших лабораторий Европы по анализу сигналов во Франции, в городе Монпелье (см. сертификат в приложении) в течении

месяца.

2. Разработанные методы нашли свое отражение при реализации автором проекта, финансируемого SOCAR (соискатель–руководитель проекта, см. сертификат в приложении).

3. На эксплуатируемом мосту в городе Баку на ул. Аб. Бакиханова (см. акт экспертизы о внедрении в приложении) проводились натурные эксперименты, подтверждающие эффективность предложенных технологий.

Основные научные результаты, выносимые на защиту:

- 1) предложена технология определения величины оценки помехокорреляции элементов нормированных корреляционных матриц, составленных из оценок нормированных корреляционных функций зашумленных сигналов;
- 2) предложена технология устранения погрешности нормирования корреляционных матриц при решении задач идентификации, эффективная даже при невыполнении классических условий;
- 3) для подтверждения эффективности предложенных технологий проведены многочисленные вычислительные эксперименты, в среде компьютерной математики Matlab;
- 4) предложено программное обеспечение, позволяющее получить нормированные корреляционные матрицы зашумленных сигналов, эквивалентные матрицам полезных сигналов;
- 5) создан пакет прикладных программ для мониторинга технического состояния крупных строительных объектов, позволяющий вычисление статистических характеристик полученных сигналов, их наглядное сравнение и визуализацию их кривых;
- 6) создан и апробирован опытный образец оборудования, пригодного для мониторинга технического состояния крупного эксплуатируемого объекта;
- 7) в течение месяца, в режиме реального времени на эксплуатируемом мосту, в центре города Баку проведены натурные эксперименты и проверена эффективность предложенных технологий;
- 8) предложенная инновационная технология формирования

корреляционных матриц зашумленных сигналов эквивалентных корреляционным матрицам полезных сигналов открывает широкие перспективы для решения задач контроля, диагностики, идентификации;

- 9) предложенная технология определения статистических характеристик помехи открывает возможность значительно уменьшить погрешность оценок традиционных способов корреляционного анализа.

Апробация работы. Основные теоретические и практические результаты, приведенные в работе, докладывались и обсуждались на следующих международных, республиканских симпозиумах и конференциях: Система Noise мониторинга аномальных сейсмических процессов и сейсмостойкости строительных объектов. Материалы научно-практической конференции «Оценка риска и проблемы безопасности в строительном комплексе», 25-26 апреля, 2013, (Баки), Noise Technologies for Minimization of Damage from Destructive Earthquakes. SE-50EEE international Conference on Earthquake Engineering, 29 to 31, 2013, May, Skopje, (Makedoniya), Применение современных компьютерных программ в обучении аудио видео дизайна, XXIII международный смотр конкурс лучших квалификационных работ по архитектуре и дизайну. Инновации в архитектурном образовании, 2014, Technology and software for calculating correct normalization of correlation functions, Image Processing and Communications Challenges 9, 2017 international Publishing AG., Springer, 9th international Conference, iP&C'2017 Bydgoszcz, Poland, September 2017, Proceedings, (Polşa, Scopus), Identification of seismic stability of high-rise buildings and construction objects by correlation matrices, BTU, ingenieurtag, Der fakultar maschinenbau, elektro-und energiesysteme gus-und osteuropatag, Neseff-Netzwerktreffen 2016, Brandenburg, (Almaniya), International Federation of Automation Control (IFAC) Reducing The Error In The Processing Of Multichannel Correlator Output Signals. 2018, (Баки).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 40 трудов, в том числе 1 монография, 2 патента (1 евразийский), из них 22 статьи и монография опубликованы за границей, в том числе: 19- на английском языке, 6- в журналах базы Scopus, 5 - в журналах Web of Science, публикации без соавторов- 10 трудов.

СОДЕРЖАНИЕ

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы и приложений. Основное содержание работы изложено на 225 страницах, включая 30 рисунков, 11 таблиц и списка литературы из 136 наименований. Приложения составляют 40 страниц.

Во введении диссертации изложена актуальность работы, приведён перечень поставленных задач, необходимых для реализации цели диссертации, описана структура и содержание работы, а также искомые результаты, выносимые на защиту.

Цель **первой главы** состоит в том, чтобы показать универсальность проблемы формирования корреляционных матриц путем разработки рациональных вычислительных алгоритмов определения оценок корреляционных функций по реализациям случайных процессов. Показывается на основе результатов уже известных из литературы, что, по существу, все типовые задачи, связанные со стохастическими процессами, а именно анализ их прохождения через динамические системы, идентификация, оптимизация, адаптация и диагностика динамических систем, требуют решения этой проблемы.

Рассматриваются трудности вычисления оценок статистических характеристик случайных многомерных процессов в реальном масштабе времени. Предлагаются модифицированные методы, согласно которым решения вышеперечисленных задач статистической динамики осуществляются при помощи эквивалентных корреляционных матриц, элементами которой являются робастные оценки корреляционных функций.

В этой главе также приводятся основные понятия и определения, которые необходимы для дальнейшего изложения. Кроме того, в последнем параграфе данной главы сформулирована постановка задачи.

Во второй главе проводится исследование и разработка эффективных методов статистической обработки сигналов в реальном масштабе времени. Предлагаются способы оценки корреляционных функций, а также рассмотрены и проанализированы особенности определения корреляционных

функций входных-выходных сигналов многомерных стохастических объектов в реальном масштабе времени. В следующем параграфе показан модифицированный статистический метод исследования многомерных статистических объектов. Также рассмотрены теория корреляции и ее применение к анализу производства. Последний параграф второй главы посвящен способу уменьшения погрешности результатов анализа многоканальных сигналов

Третья глава посвящена анализу существующих методов, алгоритмов и технологий формирования корреляционных матриц при решении задач идентификации. Показаны особенности идентификации процессов с n входами и m выходами. Рассмотрены трудности решения задач оптимизации многомерной линейной системы с конечной памятью T , определяемой матрицей импульсных переходных функций. Показано, что необходимым условием для того, чтобы можно было приступить к решению задачи оптимизации, является, как и в случае задачи идентификации, знание корреляционных матриц $\vec{R}_{xx}(\tau)$ и $\vec{R}_{xy}(\tau)$. Кроме того рассмотрена идентификация динамических характеристик линейных стационарных объектов. Приведены примеры отраслей промышленности для возможности диагностики стохастических объектов по статистическим характеристикам зашумленных сигналов. Также рассмотрена диагностика динамических систем. Показано, что для решения задачи диагностики и идентификации в изложенной постановке также требуется определение корреляционных матриц.

Кроме того, дано определение помехокорреляции и соответствующие нормированные корреляционные матрицы согласно выражениям:

$$\vec{r}_{g\dot{g}}(0) = \left\| r_{\dot{g}_i \dot{g}_j}(0) \right\| = \begin{bmatrix} 1 & \frac{R_{g_1 g_2}(0)}{\sqrt{D(g_1) \cdot D(g_2)}} \dots & \frac{R_{g_1 g_n}(0)}{\sqrt{D(g_1) \cdot D(g_n)}} \\ \frac{R_{g_2 g_1}(0)}{\sqrt{D(g_2) \cdot D(g_1)}} & 1 & \dots & \frac{R_{g_2 g_n}(0)}{\sqrt{D(g_2) \cdot D(g_n)}} \\ \frac{R_{g_n g_1}(0)}{\sqrt{D(g_n) \cdot D(g_1)}} & \frac{R_{g_n g_2}(0)}{\sqrt{D(g_n) \cdot D(g_2)}} & \dots & 1 \end{bmatrix} =$$

$$\left[\begin{array}{ccc}
1 & \frac{R_{\dot{X}_1\dot{X}_2}(0)}{\sqrt{(R_{\dot{X}_1\dot{X}_1}(0)+A(g_1))(R_{\dot{X}_2\dot{X}_2}(0)+A(g_2))}} & \dots \frac{R_{\dot{X}_1\dot{X}_n}(0)}{\sqrt{(R_{\dot{X}_1\dot{X}_1}(0)+A(g_1))(R_{\dot{X}_n\dot{X}_n}(0)+A(g_n))}} \\
\frac{R_{\dot{X}_2\dot{X}_1}(0)}{\sqrt{(R_{\dot{X}_2\dot{X}_2}(0)+A(g_2))(R_{\dot{X}_1\dot{X}_1}(0)+A(g_1))}} & 1 & \dots \frac{R_{\dot{X}_2\dot{X}_n}(0)}{\sqrt{(R_{\dot{X}_2\dot{X}_2}(0)+A(g_2))(R_{\dot{X}_n\dot{X}_n}(0)+A(g_n))}} \\
\frac{R_{\dot{X}_n\dot{X}_1}(0)}{\sqrt{(R_{\dot{X}_n\dot{X}_n}(0)+A(g_n))(R_{\dot{X}_1\dot{X}_1}(0)+A(g_1))}} & \frac{R_{\dot{X}_n\dot{X}_2}(0)}{\sqrt{(R_{\dot{X}_n\dot{X}_n}(0)+A(g_n))(R_{\dot{X}_2\dot{X}_2}(0)+A(g_2))}} & \dots 1
\end{array} \right] \quad (1)$$

$$\vec{r}_{\dot{g}\dot{\eta}}(0) = \|\vec{r}_{\dot{g}_i\dot{\eta}}(0)\| = \left[\frac{R_{\dot{g}_1\dot{\eta}}(0)}{\sqrt{D(\dot{g}_1) \cdot D(\dot{\eta})}} \frac{R_{\dot{g}_2\dot{\eta}}(0)}{\sqrt{D(\dot{g}_2) \cdot D(\dot{\eta})}} \dots \frac{R_{\dot{g}_n\dot{\eta}}(0)}{\sqrt{D(\dot{g}_n) \cdot D(\dot{\eta})}} \right]^T \approx$$

$$\approx \left[\frac{R_{\dot{X}_1\dot{\gamma}}(0)}{\sqrt{(R_{\dot{X}_1\dot{X}_1}(0)+A(g_1))(R_{\dot{\gamma}\dot{\gamma}}(0)+A(\eta))}} \frac{R_{\dot{X}_2\dot{\gamma}}(0)}{\sqrt{(R_{\dot{X}_2\dot{X}_2}(0)+A(g_2))(R_{\dot{\gamma}\dot{\gamma}}(0)+A(\eta))}} \dots \frac{R_{\dot{X}_n\dot{\gamma}}(0)}{\sqrt{(R_{\dot{X}_n\dot{X}_n}(0)+A(g_n))(R_{\dot{\gamma}\dot{\gamma}}(0)+A(\eta))}} \right]^T \quad (2)$$

$$\text{где величина} \quad A(\eta) = 2R_{\dot{\gamma}\dot{\varphi}}(0) + D(\varphi) \quad (3)$$

представляет собой величину помехокорреляции.

Как видно из выражений (1), (2), в этом случае диагональные элементы нормированной матрицы $\vec{r}_{\dot{g}\dot{g}}(0)$ уже не содержат погрешностей, а ее недиагональные элементы, а также все элементы матрицы $\vec{r}_{\dot{g}\dot{\eta}}(0)$, содержат погрешности в виде величин помехокорреляций $A(g_i)$, $A(\eta)$.

Аналогично при наличии корреляции между полезными сигналами и помехами, то есть при выполнении классических условий, корреляционные матрицы, которые используются при решении задачи идентификации динамики приобретают вид:

$$\vec{R}_{\dot{g}\dot{g}}(\mu) = \begin{vmatrix} R_{\dot{g}\dot{g}}(0) & R_{\dot{g}\dot{g}}(\Delta t) & \dots & R_{\dot{g}\dot{g}}[(N-1)\Delta t] \\ R_{\dot{g}\dot{g}}(\Delta t) & R_{\dot{g}\dot{g}}(0) & \dots & R_{\dot{g}\dot{g}}[(N-2)\Delta t] \\ R_{\dot{g}\dot{g}}[(N-1)\Delta t] & R_{\dot{g}\dot{g}}[(N-2)\Delta t] & \dots & R_{\dot{g}\dot{g}}(0) \end{vmatrix} =$$

$$= \left\| \begin{vmatrix} R_{\dot{X}\dot{X}}(0) + A(g) & R_{\dot{X}\dot{X}}(\Delta t) & \dots & R_{\dot{X}\dot{X}}[(N-1)\Delta t] \\ R_{\dot{X}\dot{X}}(\Delta t) & R_{\dot{X}\dot{X}}(0) + A(g) & \dots & R_{\dot{X}\dot{X}}[(N-2)\Delta t] \\ R_{\dot{X}\dot{X}}[(N-1)\Delta t] & R_{\dot{X}\dot{X}}[(N-2)\Delta t] & \dots & R_{\dot{X}\dot{X}}(0) + A(g) \end{vmatrix} \right\| \quad (4)$$

$$\vec{R}_{\dot{g}\dot{\eta}}(\mu) = [R_{\dot{g}\dot{\eta}}(0)R_{\dot{g}\dot{\eta}}(\Delta t) \dots R_{\dot{g}\dot{\eta}}[(N-1)\Delta t]^T \approx$$

$$\approx [R_{\dot{X}\dot{\gamma}}(0)R_{\dot{X}\dot{\gamma}}(\Delta t) \dots R_{\dot{X}\dot{\gamma}}[(N-1)\Delta t]^T \quad (5)$$

$$\text{где} \quad A(g) = 2R_{\dot{X}\dot{\varepsilon}}(0) + D(\varepsilon). \quad (6)$$

Четвертая глава посвящена корреляционным матрицам, как исходным данным для решения задач идентификации, оптимизации, диагностики и адаптивирования. В первом параграфе подробно рассмотрены алгоритмы вычисления робастных оценок

корреляционных функций. Также показан физический смысл робастных оценок корреляционных функций. Как известно, корреляционная функция определяет вероятность того, что случайная функция $m(t)$, имея в момент t значение X_1 , в момент $t + \tau$ будет иметь значение X_2 , т.е. характеризует взаимную связь между $X(t)$ и $X(t + \tau)$. Корреляционной функции показывает, насколько быстро эта связь меняется за время $\Delta\tau$. Если ее значение равно нулю, то это значит, что корреляция между $X(t)$ и $X(t + \tau)$ за время $\Delta\tau$ не изменилась.

Для многомерных объектов также можно написать соответствующие уравнения. Из изложенного следует, что определением матриц первых разностей корреляционных функций на входе и первых разностей взаимно корреляционных функций на входе-выходе можно решить задачи идентификации, оптимизации, анализа и диагностирования многомерных случайных систем статистическими методами. Здесь же показано применение метода стохастической коррекции для вычисления оценок знаковых и релейных корреляционных функций случайных процессов.

Далее рассмотрены особенности формирования корреляционной матрицы многомерных объектов в реальном масштабе времени. Показано, что при этом диагностирование позволяет выявить аварийные ситуации, источники которых нельзя обнаружить непосредственно по записям входных и выходных сигналов. Последнее может иметь место, например, при неисправностях отдельных элементов, которые не приводят к полной потере работоспособности, но изменяют динамические характеристики системы.

Анализ статистических входных и выходных характеристик совместно с вычислением матрицы импульсных переходных функций позволяет установить происходят ли изменения режима работы (т.е. переход из одного состояния, например из нормального в аварийное или начало зарождения дефекта в системе) системы за счет внутренних неисправностей или за счет влияния внешних факторов, например, таких, как изменения характеристик самих входных сигналов или появления дополнительных возмущений и помех. Из сказанного следует, что решение задачи диагностирования в изложенной постановке

также требует определения матриц корреляционных функций. Следующий параграф посвящен особенностям вычисления корреляционной матрицы многомерных объектов в реальном масштабе времени. Показано, что для улучшения искомых оценок промышленных и стратегических объектов целесообразно учитывать время запаздывания между входным и выходным сигналами.

Далее глава посвящена приведению зашумленных корреляционных матриц к адекватным матрицам полезных сигналов, устранив влияние помехи как в случае статики, так и в динамики. Предложена технология формирования робастных корреляционных матриц и скорректированных нормированных корреляционных матриц матричных уравнений многомерных стохастических объектов как при наличии корреляции между полезным сигналом и помехой, так и при ее отсутствии. Благодаря чему появляется возможность обеспечения адекватности мониторинга скрытого периода перехода объекта в аварийное состояние. Однако, для реальных объектов, как правило, входные и выходные параметры являются различными физическими величинами (например, расход, давление, температура, скорость и т.д.), имеющими различный диапазон изменения значений. Поэтому в существующей литературе считается, что для решения указанных задач необходимо привести значения технологических параметров к единым безразмерным величинам, что оказывается возможным при применении процедуры нормирования. Тогда вместо корреляционных матриц $\vec{R}_{\dot{X}\dot{X}}(0)$, $\vec{R}_{\dot{X}\dot{Y}}(0)$, $\vec{R}_{\dot{X}\dot{X}}(\mu)$, $\vec{R}_{\dot{X}\dot{Y}}(\mu)$, получают соответствующие нормированные корреляционные матрицы $\vec{r}_{\dot{X}\dot{X}}(0)$, $\vec{r}_{\dot{X}\dot{Y}}(0)$, $\vec{r}_{\dot{X}\dot{X}}(\mu)$, $\vec{r}_{\dot{X}\dot{Y}}(\mu)$:

$$\vec{r}_{\dot{X}\dot{X}}(0) = \left\| R_{\dot{X}_i\dot{X}_j}(0) \right\| = =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{R_{\dot{X}_1\dot{X}_1}(0)}{D(X_1)} & \frac{R_{\dot{X}_1\dot{X}_2}(0)}{\sqrt{D(X_1).D(X_2)}} \cdots & \frac{R_{\dot{X}_1\dot{X}_n}(0)}{\sqrt{D(X_1).D(X_n)}} \\ \frac{R_{\dot{X}_2\dot{X}_1}(0)}{\sqrt{D(X_2).D(X_1)}} & \frac{R_{\dot{X}_2\dot{X}_2}(0)}{D(X_2)} \cdots & \frac{R_{\dot{X}_2\dot{X}_n}(0)}{\sqrt{D(X_2).D(X_n)}} \\ \frac{R_{\dot{X}_n\dot{X}_1}(0)}{\sqrt{D(X_n).D(X_1)}} & \frac{R_{\dot{X}_n\dot{X}_2}(0)}{\sqrt{D(X_n).D(X_2)}} \cdots & \frac{R_{\dot{X}_n\dot{X}_n}(0)}{D(X_n)} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & \frac{R_{\dot{X}_1\dot{X}_2}(0)}{\sqrt{D(X_1)D(X_2)}} \cdots & \frac{R_{\dot{X}_1\dot{X}_n}(0)}{\sqrt{D(X_1)D(X_n)}} \\ \frac{R_{\dot{X}_2\dot{X}_1}(0)}{\sqrt{D(X_2)D(X_1)}} & 1 & \cdots & \frac{R_{\dot{X}_2\dot{X}_n}(0)}{\sqrt{D(X_2)D(X_n)}} \\ \frac{R_{\dot{X}_n\dot{X}_1}(0)}{\sqrt{D(X_n)D(X_1)}} & \frac{R_{\dot{X}_n\dot{X}_2}(0)}{\sqrt{D(X_n)D(X_2)}} \cdots & 1 & \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\vec{r}_{\dot{X}\dot{Y}}(0) = \|r_{\dot{X}\dot{Y}}(0)\| = \left[\frac{R_{\dot{X}_1\dot{Y}}(0)}{\sqrt{D(X_1)D(Y)}} \frac{R_{\dot{X}_2\dot{Y}}(0)}{\sqrt{D(X_2)D(Y)}} \cdots \frac{R_{\dot{X}_n\dot{Y}}(0)}{\sqrt{D(X_n)D(Y)}} \right],$$

$$\vec{r}_{\dot{X}\dot{X}}(\mu) = \|r_{\dot{X}\dot{X}}(\mu)\| = \begin{bmatrix} \frac{R_{\dot{X}\dot{X}}(0)}{D(X)} & \frac{R_{\dot{X}\dot{X}}(\Delta t)}{D(X)} \cdots & \frac{R_{\dot{X}\dot{X}}[(N-1)\Delta t]}{D(X)} \\ \frac{R_{\dot{X}\dot{X}}(\Delta t)}{D(X)} & \frac{R_{\dot{X}\dot{X}}(0)}{D(X)} \cdots & \frac{R_{\dot{X}\dot{X}}[(N-2)\Delta t]}{D(X)} \\ \frac{R_{\dot{X}\dot{X}}[(N-1)\Delta t]}{D(X)} & \frac{R_{\dot{X}\dot{X}}[(N-2)\Delta t]}{D(X)} \cdots & \frac{R_{\dot{X}\dot{X}}(0)}{D(X)} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & \frac{R_{\dot{X}\dot{X}}(\Delta t)}{D(X)} \cdots & \frac{R_{\dot{X}\dot{X}}[(N-1)\Delta t]}{D(X)} \\ \frac{R_{\dot{X}\dot{X}}(\Delta t)}{D(X)} & 1 & \cdots & \frac{R_{\dot{X}\dot{X}}[(N-2)\Delta t]}{D(X)} \\ \frac{R_{\dot{X}\dot{X}}[(N-1)\Delta t]}{D(X)} & \frac{R_{\dot{X}\dot{X}}[(N-2)\Delta t]}{D(X)} & \cdots & 1 \end{bmatrix},$$

$$\vec{r}_{\dot{X}\dot{Y}}(\mu) = \|r_{\dot{X}\dot{Y}}(\mu)\| = \left[\frac{R_{\dot{X}\dot{Y}}(0)}{\sqrt{D(X)D(Y)}} \frac{R_{\dot{X}\dot{Y}}(\Delta t)}{\sqrt{D(X)D(Y)}} \cdots \frac{R_{\dot{X}\dot{Y}}[(N-1)\Delta t]}{\sqrt{D(X)D(Y)}} \right]^T,$$

где $D(X_i)$, $D(X)$, $D(Y)$ — величины дисперсий сигналов $X_i(t)$, $X(t)$, $Y(t)$.

Далее рассматривается один из возможных вариантов решения указанных задач.

Рассмотрим подробнее технологию улучшения обусловленности корреляционных матриц при решении задач идентификации, которая обеспечивает улучшение их обусловленности.

1. Для каждого зашумленного входного $g_i(t)$, $i = \overline{1, n}$ и выходного $\eta(t)$ сигналов определяются оценки авто и взаимно корреляционных функций:

$$R_{g_i g_j}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \dot{g}_i(k\Delta t) \dot{g}_j((k + \mu)\Delta t),$$

$$R_{\dot{g}_i \dot{\eta}}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \dot{g}_i(k\Delta t) \dot{\eta}((k + \mu)\Delta t), \quad j = \overline{1, n} \quad (8)$$

2. Для каждого зашумленного входного $\dot{g}_i(t)$ и выходного $\dot{\eta}(t)$ сигналов определяются величины помехокорреляции

$$A^*(g_i) = R_{\dot{g}_i \dot{g}_i}(\mu = 0) - 2R_{\dot{g}_i \dot{g}_i}(\mu = 1) + R_{\dot{g}_i \dot{g}_i}(\mu = 2) \quad (9)$$

$$A^*(\eta) = R_{\eta\eta}(\mu = 0) - 2R_{\eta\eta}(\mu = 1) + R_{\eta\eta}(\mu = 2). \quad (10)$$

3. Используя величины помехокорреляций $A^*(g_i)$, $A^*(\eta)$, формируются робастные корреляционные матрицы и нормированные корреляционные матрицы, которые применяются при решении задач идентификации статики:

$$\vec{R}_{g\dot{g}}^R(0) = \begin{bmatrix} R_{\dot{g}_1\dot{g}_1}(0) - A^*(g_1) & R_{\dot{g}_1\dot{g}_2}(0) & \dots & R_{\dot{g}_1\dot{g}_n}(0) \\ R_{\dot{g}_2\dot{g}_1}(0) & R_{\dot{g}_2\dot{g}_2}(0) - A^*(g_2) & \dots & R_{\dot{g}_2\dot{g}_n}(0) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{\dot{g}_n\dot{g}_1}(0) & R_{\dot{g}_n\dot{g}_2}(0) & \dots & R_{\dot{g}_n\dot{g}_n}(0) - A^*(g_n) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\vec{r}_{\dot{g}\dot{g}}^R(0) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{R_{\dot{g}_1\dot{g}_2}(0)}{\sqrt{(R_{\dot{g}_1\dot{g}_1}(0) - A^*(g_1))(R_{\dot{g}_2\dot{g}_2}(0) - A^*(g_2))}} \dots & \frac{R_{\dot{g}_1\dot{g}_n}(0)}{\sqrt{(R_{\dot{g}_1\dot{g}_1}(0) - A^*(g_1))(R_{\dot{g}_n\dot{g}_n}(0) - A^*(g_n))}} \\ \frac{R_{\dot{g}_2\dot{g}_1}(0)}{\sqrt{(R_{\dot{g}_2\dot{g}_2}(0) - A^*(g_2))(R_{\dot{g}_1\dot{g}_1}(0) - A^*(g_1))}} & 1 & \frac{R_{\dot{g}_2\dot{g}_n}(0)}{\sqrt{(R_{\dot{g}_2\dot{g}_2}(0) - A^*(g_2))(R_{\dot{g}_n\dot{g}_n}(0) - A^*(g_n))}} \\ \frac{R_{\dot{g}_n\dot{g}_1}(0)}{\sqrt{(R_{\dot{g}_n\dot{g}_n}(0) - A^*(g_n))(R_{\dot{g}_1\dot{g}_1}(0) - A^*(g_1))}} & \frac{R_{\dot{g}_n\dot{g}_2}(0)}{\sqrt{(R_{\dot{g}_n\dot{g}_n}(0) - A^*(g_n))(R_{\dot{g}_2\dot{g}_2}(0) - A^*(g_2))}} & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\vec{r}_{\dot{g}\eta}^R(0) \approx \begin{bmatrix} \frac{R_{\dot{g}_1\eta}(0)}{\sqrt{(R_{\dot{g}_1\dot{g}_1}(0) - A^*(g_1))(R_{\eta\eta}(0) - A^*(\eta))}} & \frac{R_{\dot{g}_2\eta}(0)}{\sqrt{(R_{\dot{g}_2\dot{g}_2}(0) - A^*(g_2))(R_{\eta\eta}(0) - A^*(\eta))}} \dots & \frac{R_{\dot{g}_n\eta}(0)}{\sqrt{(R_{\dot{g}_n\dot{g}_n}(0) - A^*(g_n))(R_{\eta\eta}(0) - A^*(\eta))}} \end{bmatrix} \quad (13)$$

4. Используя величины помехокорреляций $A^*(g)$, $A^*(\eta)$, формируются робастные корреляционные матрицы и нормированные корреляционные матрицы, которые используются при решении задач идентификации динамики:

$$\vec{R}_{g\dot{g}}^R(\mu) = \left\| \begin{bmatrix} R_{g\dot{g}}(0) - A^*(g) & R_{g\dot{g}}(\Delta t) & \dots & R_{g\dot{g}}[(N-1)\Delta t] \\ R_{g\dot{g}}(\Delta t) & R_{g\dot{g}}(0) - A^*(g) & \dots & R_{g\dot{g}}[(N-2)\Delta t] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{g\dot{g}}[(N-1)\Delta t] & R_{g\dot{g}}[(N-2)\Delta t] & \dots & R_{g\dot{g}}(0) - A^*(g) \end{bmatrix} \right\| \quad (14)$$

$$\vec{r}_{g\dot{g}}^R(\mu) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{R_{g\dot{g}}(\Delta t)}{R_{g\dot{g}}(0)-A^*(g)} \cdots & \frac{R_{g\dot{g}}[(N-1)\Delta t]}{R_{g\dot{g}}(0)-A^*(g)} \\ \frac{R_{g\dot{g}}(\Delta t)}{R_{g\dot{g}}(0)-A^*(g)} & 1 & \cdots & \frac{R_{g\dot{g}}[(N-2)\Delta t]}{R_{g\dot{g}}(0)-A^*(g)} \\ \frac{R_{g\dot{g}}[(N-1)\Delta t]}{R_{g\dot{g}}(0)-A^*(g)} & \frac{R_{g\dot{g}}[(N-2)\Delta t]}{R_{g\dot{g}}(0)-A^*(g)} \cdots & & 1 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$\vec{r}_{g\dot{\eta}}^R(\mu) =$$

$$\left[\frac{R_{g\dot{\eta}}(0)}{\sqrt{(R_{g\dot{g}}(0)-A^*(g))(R_{\eta\dot{\eta}}(0)-A^*(\eta))}} \frac{R_{g\dot{\eta}}(\Delta t)}{\sqrt{(R_{g\dot{g}}(0)-A^*(g))(R_{\eta\dot{\eta}}(0)-A^*(\eta))}} \cdots \frac{R_{g\dot{g}}[(N-1)\Delta t]}{\sqrt{(R_{g\dot{g}}(0)-A^*(g))(R_{\eta\dot{\eta}}(0)-A^*(\eta))}} \right]$$

5. Для случая, когда отсутствует корреляция между полезным сигналом и помехой, вычисляются оценки дисперсий помех $D^*(\varepsilon_i)$, $D^*(\varphi)$:

$$D^*(\varepsilon_i) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [\dot{g}_i(k\Delta t)\dot{g}_i(k\Delta t) - 2\dot{g}_i(k\Delta t)\dot{g}_i((k+1)\Delta t) + g(k\Delta t)\dot{g}_i((k+2)\Delta t)],$$

$$D^*(\varphi) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [\dot{\eta}(k\Delta t)\dot{\eta}(k\Delta t) - 2\dot{\eta}(k\Delta t)\dot{\eta}((k+1)\Delta t) + \dot{\eta}(k\Delta t)\dot{\eta}((k+2)\Delta t)].$$

6. Применяя вычисленные оценки дисперсий помех $D^*(\varepsilon_i)$, $D^*(\varphi)$, формируются робастные корреляционные матрицы и робастные нормированные корреляционные матрицы, которые используются при решении задач идентификации статики:

$$\vec{R}_{g\dot{g}}^R = \begin{bmatrix} R_{g_1\dot{g}_1}(0) - D^*(\varepsilon_1) & R_{g_1\dot{g}_2}(0) \cdots & R_{g_1\dot{g}_n}(0) \\ R_{g_2\dot{g}_1}(0) & R_{g_2\dot{g}_2}(0) - D^*(\varepsilon_2) \cdots & R_{g_2\dot{g}_n}(0) \\ R_{g_n\dot{g}_1}(0) & R_{g_n\dot{g}_2}(0) & R_{g_n\dot{g}_n}(0) - D^*(\varepsilon_n) \end{bmatrix}$$

$$\vec{r}_{g\dot{g}}^R(0) =$$

$$\left[\begin{array}{ccc} 1 & \frac{R_{g_1\dot{g}_2}(0)}{\sqrt{(R_{g_1\dot{g}_1}(0)-D^*(\varepsilon_1))R_{g_2\dot{g}_2}(0)-D^*(\varepsilon_n)}} \cdots & \frac{R_{g_1\dot{g}_n}(0)}{\sqrt{(R_{g_1\dot{g}_1}(0)-D^*(\varepsilon_1))R_{g_n\dot{g}_n}(0)-D^*(\varepsilon_n)}} \\ \frac{R_{g_2\dot{g}_1}(0)}{\sqrt{(R_{g_2\dot{g}_2}(0)-D^*(\varepsilon_2))(R_{g_1\dot{g}_1}(0)-D^*(\varepsilon_1))}} & 1 & \cdots & \frac{R_{g_2\dot{g}_n}(0)}{\sqrt{(R_{g_2\dot{g}_2}(0)-D^*(\varepsilon_2))(R_{g_n\dot{g}_n}(0)-D^*(\varepsilon_n))}} \\ \frac{R_{g_n\dot{g}_1}(0)}{\sqrt{(R_{g_n\dot{g}_n}(0)-D^*(\varepsilon_n))(R_{g_1\dot{g}_1}(0)-D^*(\varepsilon_1))}} & \frac{R_{g_n\dot{g}_2}(0)}{\sqrt{(R_{g_n\dot{g}_n}(0)-D^*(\varepsilon_n))(R_{g_2\dot{g}_2}(0)-D^*(\varepsilon_2))}} & & 1 \end{array} \right]$$

(16)

$$\vec{r}_{g\dot{\eta}}^R(0) \approx$$

$$\approx \left[\frac{R_{g_1\dot{\eta}}(0)}{\sqrt{(R_{g_1\dot{g}_1}(0)-D^*(\varepsilon_1))(R_{\eta\dot{\eta}}(0)-D^*(\varphi))}} \frac{R_{g_2\dot{\eta}}(0)}{\sqrt{(R_{g_2\dot{g}_2}(0)-D^*(\varepsilon_2))(R_{\eta\dot{\eta}}(0)-D^*(\varphi))}} \cdots \frac{R_{g_n\dot{\eta}}(0)}{\sqrt{(R_{g_n\dot{g}_n}(0)-D^*(\varepsilon_2))(R_{\eta\dot{\eta}}(0)-D^*(\varphi))}} \right]$$

(17)

7. Используя вычисленные оценки дисперсий помех $D^*(\varepsilon_i)$, $D^*(\varphi)$, формируются скорректированные корреляционные матрицы и робастные нормированные корреляционные матрицы, которые применяются при решении задач идентификации

динамики. Таким образом, показано, что технология формирования робастных корреляционных матриц и робастных (корректированных) нормированных матриц позволяет путем устранения влияния величины помехокорреляции преобразовать матрицы зашумленных технологических параметров к виду, аналогичному виду матриц, элементы которых не содержат погрешностей от помех. В результате появляется возможность решить задачи идентификации статики и динамики скрытого периода перехода промышленного объекта из нормального в аварийное состояние. В следующем параграфе рассмотрен метод приближенного определения коэффициентов уравнения регрессии в реальном масштабе времени. Далее рассмотрено приведение матрицы к линейному виду, определение коэффициентов и нахождение импульсно-переходной функции.

Исходя из вышеизложенных выкладок и формул, целесообразно осуществить их в следующей последовательности:

- вычислить корреляционные функции и составить матрицу;
- вычислить дисперсию помехи;
- вычислить корректированные нормированные функции и составить корректированную нормированную корреляционную матрицу;
- вычислить величину помехокорреляции, и вычесть ее из каждого элемента корректированной нормированной корреляционной матрицы, состоящей из корректированных нормированных корреляционных функций. Привести матрицу к более-менее удобному виду;
- найти коэффициенты уравнения регрессии и импульсно-переходную функцию.

Пятая глава посвящена технологии формирования корректированных (эквивалентных) нормированных корреляционных матриц матричных уравнений в среде компьютерной математики Matlab. В связи с этим рассмотрен вопрос интерполяции экспериментальных данных, рассмотрены рациональные методы экстра- и интерполяции измеряемой величины и связь параметров интерполяционного многочлена со средней квадратичной погрешностью величины. Далее показана необходимость перехода на нормированные оценки корреляционных функций и матриц.

Известно, что стандартизация или нормирование приводит значения всех преобразованных переменных к единому диапазону значений путем выражения через отношение этих значений к некоей величине, отражающей определенные свойства конкретного признака. В то же время процесс нормирования действительно позволяет независимо сравнивать взаимные корреляции абсолютных значений данных. Кроме того, часто требуется нормировка показателей, и это удобно для того, чтобы перейти к безразмерным переменным. Также, часто случайные функции аппроксимируются нормированной корреляционной функцией. Принято сразу переходить к нормированным корреляционным функциям, так как считается, что нормированные корреляционные функции удобны тем, что их значения не превышают единицу. Известно также, что для оценки степени зависимости сечений случайной функции удобнее пользоваться нормированием корреляционной функции. Также, общепринято, что нормированную корреляционную функцию используют для того, чтобы иметь возможность сравнивать процессы с различными значениями дисперсий. Далее рассмотрены проблемы формирования нормированных корреляционных матриц матричных уравнений многомерных стохастических процессов. После теоретических выкладок матричные уравнения приведены к виду: элементы робастной нормированной корреляционной матрицы

$$r_{g\dot{g}}^R(0) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{R_{g_1g_2}(0)}{\sqrt{(D(g_1) - D^*(\varepsilon_1)) \cdot (D(g_2) - D^*(\varepsilon_2))}} \cdots \frac{R_{g_1g_n}(0)}{\sqrt{(D(g_1) - D^*(\varepsilon_1)) \cdot (D(g_n) - D^*(\varepsilon_n))}} \\ \frac{R_{g_2g_1}(0)}{\sqrt{(D(g_2) - D^*(\varepsilon_2)) \cdot (D(g_1) - D^*(\varepsilon_1))}} & 1 \cdots \frac{R_{g_2g_n}(0)}{\sqrt{(D(g_2) - D^*(\varepsilon_2)) \cdot (D(g_n) - D^*(\varepsilon_n))}} \\ \frac{R_{g_n g_1}(0)}{\sqrt{(D(g_n) - D^*(\varepsilon_n)) \cdot (D(g_1) - D^*(\varepsilon_1))}} & \frac{R_{g_n g_2}(0)}{\sqrt{(D(g_n) - D^*(\varepsilon_n)) \cdot (D(g_2) - D^*(\varepsilon_2))}} \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$r_{g\dot{\eta}}^R(0) = \left[\frac{R_{g_1\dot{\eta}}(0)}{\sqrt{(D(g_1) - D^*(\varepsilon_1))(D(\eta) - D^*(\varphi))}} \sqrt{\frac{R_{g_2\dot{\eta}}(0)}{(D(g_2) - D^*(\varepsilon_2))(D(\eta) - D^*(\varphi))}} \cdots \sqrt{\frac{R_{g_n\dot{\eta}}(0)}{(D(g_n) - D^*(\varepsilon_n))(D(\eta) - D^*(\varphi))}} \right]$$

$$r_{g\dot{\eta}}^R(\mu) = [r_{g\dot{\eta}}^R(0)r_{g\dot{\eta}}^R(\Delta t) \cdots r_{g\dot{\eta}}^R[(N-1)\Delta t]] =$$

$$\left[\frac{R_{g\dot{\eta}}(0)}{\sqrt{(D(g) - D^*(\varepsilon))(D(\eta) - D^*(\varphi))}} \sqrt{\frac{R_{g\dot{\eta}}(\Delta t)}{(D(g) - D^*(\varepsilon))(D(\eta) - D^*(\varphi))}} \cdots \sqrt{\frac{R_{g\dot{\eta}}[(N-1)\Delta t]}{(D(g) - D^*(\varepsilon))(D(\eta) - D^*(\varphi))}} \right]$$

Ниже приведены результаты вычислительных экспериментов в среде компьютерной математике Matlab: для полезного сигнала $x(t)=40\sin(t)$ и случайной помехи с параметром $b=10$ Rayleigh-распределения $f(\varepsilon/b) = \frac{\varepsilon}{b^2} e^{-\frac{\varepsilon^2}{2b^2}}$

N	Оценки	$\Delta t = \pi/50$	$\Delta t = \pi/100$	$\Delta t = \pi/200$	$\Delta t = \pi/400$
1	$D(\varepsilon)$	42.1551	42.1551	42.1551	44.0943
2	$D^*(\varepsilon)$	32.2980	41.6845	42.2997	42.269
3	$proc, \%$	6.7775	1.1163	0.2719	2.8743
4	ΔR_1	1.5786	0.3948	0.0987	0.0247
5	ΔR_2	4.7296	1.1839	0.2961	0.0740
6	$R_{00}(\varepsilon)$	2.9532	-3.4593	-6.0727	-0.6590
7	$R_{00}(1)$	2.8830	-3.5146	-6.0627	-0.6402
8	$R_{00}(2)$	2.8122	-3.5610	-6.0484	-0.6215
9	$R_{00}(\varepsilon)$	2.9532	-3.4593	-6.0727	-0.6590
10	$R_{00}(1)$	2.9998	-3.4066	-6.0842	-0.06777
11	$R_{00}(2)$	3.0346	-3.3506	-6.0943	-0.6963
12	P_1	-3.1510	-0.7891	-0.1974	-0.0493
13	P_2	-4.8677e-004	0.0089	0.0042	-1.9109e-004
14	P_3	-0.0118	0.0034	0.0015	4.1801e-005
15	$r_{00}(\varepsilon)$	0.0158	-0.1090	-0.0331	-0.0035

Таким образом, можно считать, что вычислительные эксперименты проведены в соответствии с теоретическими условиями и поэтому результаты вычислительных экспериментов

оказались успешными. Причем с уменьшением шага дискретизации относительная погрешность вычисленного значения дисперсии помехи значительно уменьшалась и при $\Delta t \leq \pi/200$ во многих случаях практически была равна нулю.

Шестая глава посвящена подготовке специального программного продукта для вычисления адекватных нормированных матриц входных и выходного сигналов и их статистических характеристик. В соответствие с технологией, описанной в предыдущих главах, подготовлен специальный программный продукт в JavaFXusingJavaJDK v1.8: Compiledonintel 17 x64Windows 10. Это было сделано по нескольким существенным причинам.

Во-первых, программа Matlab крайне высокооплачиваема и ее установка занимает несколько часов, а библиотеки, необходимые для работ с сигналами, вызывают дополнительные трудности. Кроме того, Matlab занимает несколько Гбайт памяти.

Во-вторых, программа предназначена для компьютеров, соответствующих высоким стандартам и параметрам. Преимущества же данного программного обеспечения (ПО) состоят в следующем:

1. занимает программа всего 2 Мб;
2. установка программы делается за долю секунды;
3. интерфейс программы предназначен исключительно для решения данной задачи и с легкостью может быть использован обычным оператором;
4. не требует установки, каких-либо дополнительных программ и не предъявляет особых требований к системе.

Ниже представлен интерфейс программы.

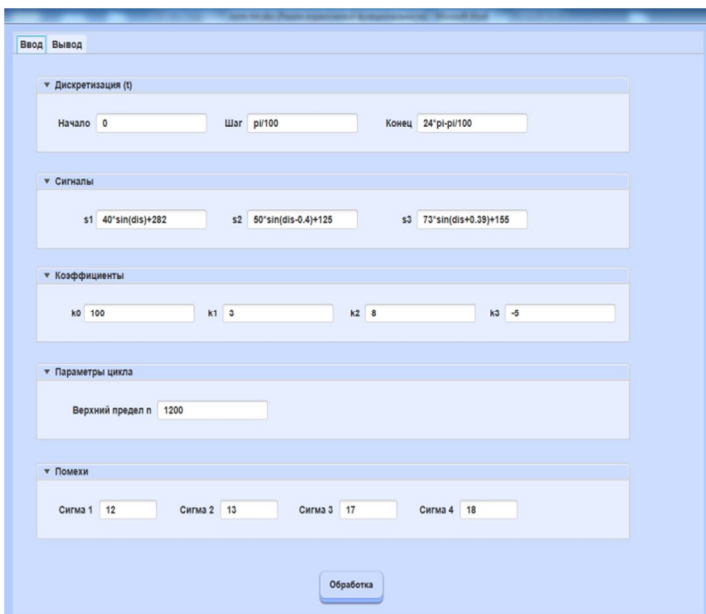


Рис. 1. Интерфейс окна программы для ввода данных

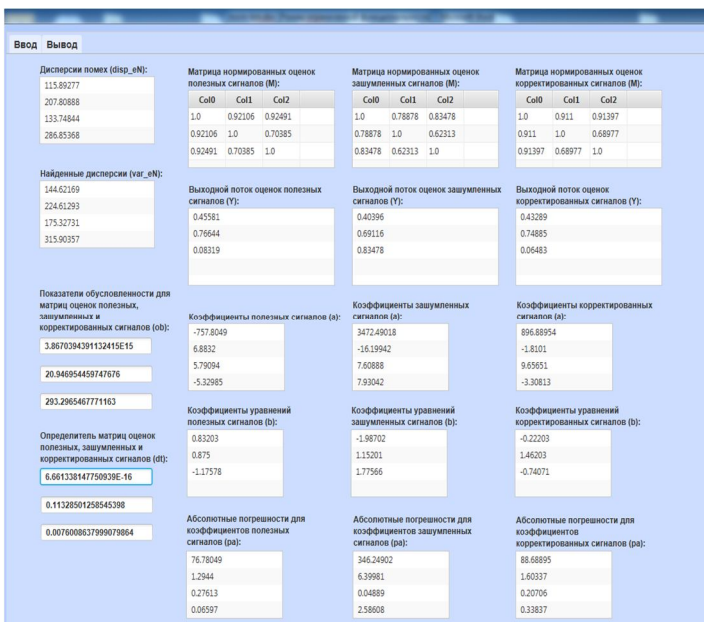


Рис. 2. Интерфейс окна программы для вывода данных.

В седьмой главе рассмотрены технологии экспериментального исследования стохастических процессов, погрешности средств измерений и их нормирование, а также проведение натурных экспериментов на эксплуатируемом мосту на улице Аб. Бакиханова. Для определения точных статистических характеристик зашумленного сигнала, являющихся, в свою очередь, элементами корреляционной матрицы и повышения точности вычисления, которая определяет ее эквивалентность с матрицей полезного сигнала, была создана специальная программа. Программа была написана в среде объектно-ориентированного программирования Delphi, который выбран не случайно. Учитывая, что Delphi-язык со строгой статической типизацией переменных, наилучший вариант для создания данного ПО. Ниже показаны основные окна программы при ее работе.

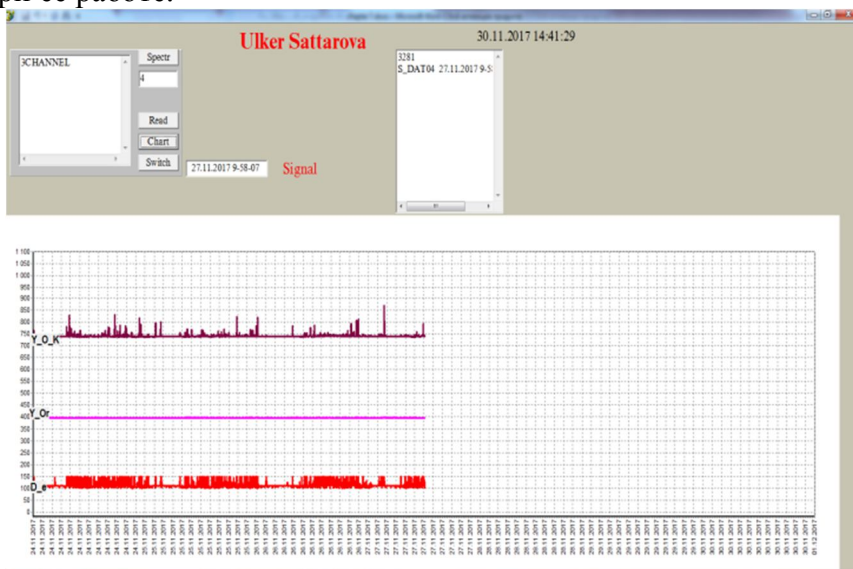


Рис.3 Окно интерфейса ПО для ввода данных

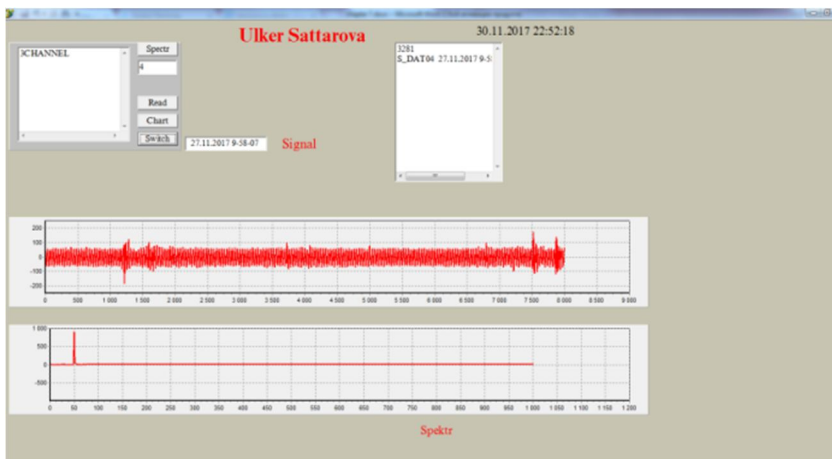


Рис 4. Окно интерфейса ПО для вывода данных.

Данное программное обеспечение раскрывает широкие возможности для точного и корректного определения статистических характеристик зашумленного сигнала, что, в свою очередь, открывает все возможности для составления робастных (эквивалентных) корреляционных матриц зашумленных сигналов технологических процессов. Также открыты широкие возможности для визуализации их кривых и их наглядного сравнения. Далее был начат процесс создания опытного образца для проведения натуральных экспериментов с целью проверки эффективности предложенных технологий. Для проведения необходимых исследований и натурального эксперимента понадобились соответствующие разрешения ответственных структур, т.к. мосты являются стратегическими и охраняемыми объектами.

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

В то же время для изготовления требуемой установки необходима была покупка 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. Кроме того, к нему был подключен российский микроконтроллер марки CPU188 фирмы «Fastwel», а также был выделен отдельный компьютер и UPS, к которому кроме компьютера был также подключен и микроконтроллер. UPS, в свою очередь, был подключен к стабилизатору, обеспечивающему постоянный электрический ток в 220V. Таким образом, в СКБ НАНА был укомплектован опытный образец для начала натуральных экспериментов. Структурная схема данной комплектации представлена ниже (Рис.4). Постоянная подача электричества на пролетное строение (рядом с опорной частью) была обеспечена посредством подачи из специального охранного помещения, построенного под мостом. Схематическое расположение оборудования представлено на Рис.5.

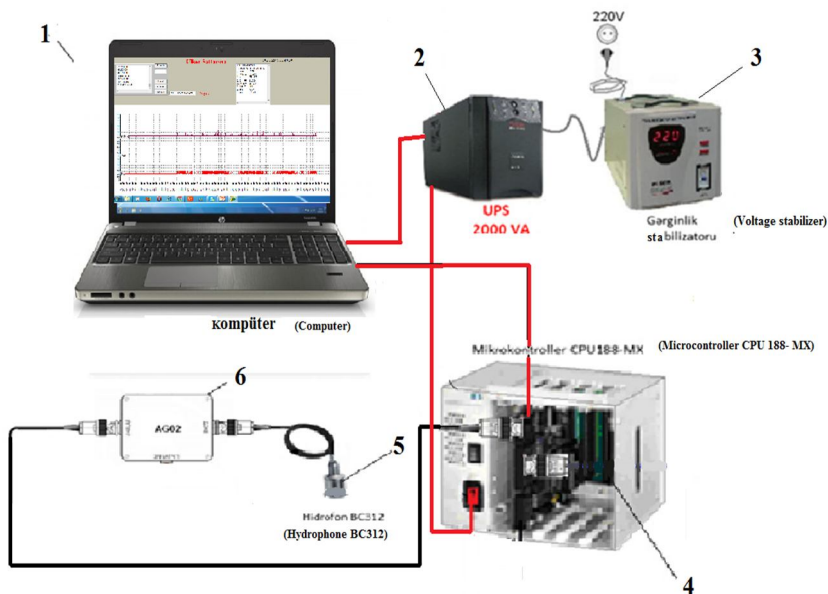


Рис. 4. Структурная схема опытного образца.

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

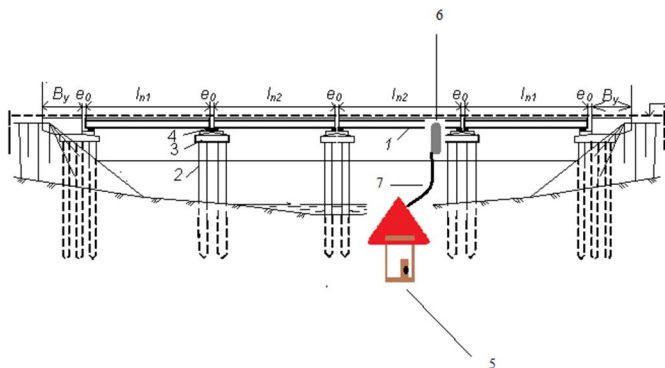


Рис. 5. Структурная схема моста.

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

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. Следует отметить, что оборудование не выключается и работает 24 часа в сутки в режиме реального времени.



Рис. 7. Фото оборудования на эксплуатируемом мосту

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

Благодаря инновационной технологии, соответствующему ПО и установленному оборудованию удалось провести натурный эксперимент и анализировать реальные стохастические сигналы, их характеристики по предложенным и известным технологиям, обеспечив таким образом формирование адекватных корреляционных матриц зашумленных сигналов и получить их скорректированные значения, практически, совпадающие с значениями нормированных корреляционных матриц полезных сигналов. Таким образом, подтвердив все теоретические выкладки, предложенные в предыдущих главах.

Результаты внедрения и другие вспомогательные материалы представлены в приложении к диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Проведенные исследования и полученные результаты позволяют сделать следующие обобщения и выводы:

1. предложена технология определения величины оценки помехокорреляции элементов нормированных корреляционных матриц, составленных из оценок нормированных корреляционных функций зашумленных сигналов, состоящих из суммы полезных сигналов и помех;

2. предложена технология устранения погрешности нормирования корреляционных матриц при решении задач идентификации, эффективная даже при невыполнении классических условий и «плохой» обусловленности корреляционных матриц;

3. проведены многочисленные вычислительные эксперименты, в среде компьютерной математики Matlab, для подтверждения эффективности предложенных технологий;

4. предложено программное обеспечение, позволяющее получить нормированные корреляционные матрицы зашумленных сигналов, эквивалентные матрицам полезных сигналов. Созданное программное обеспечение позволяет корректное вычисление статистических характеристик, их сравнение, нахождение коэффициентов уравнения регрессии и импульсно-переходной функции;

5. создан пакет прикладных программ для мониторинга технического состояния крупных строительных объектов, позволяющий вычисление статистических характеристик полученных сигналов, их наглядное сравнение и визуализацию их кривых;

6. создан и апробирован опытный образец оборудования, пригодного для мониторинга технического состояния промышленного или строительного объекта;

7. проведены натурные эксперименты в течение месяца на реальном эксплуатируемом объекте, на примере эксплуатируемого моста в центре города Баку, в режиме реального времени и проверена эффективность предложенных технологий;

8. предложенная инновационная технология формирования корреляционных матриц зашумленных сигналов эквивалентных

корреляционным матрицам полезных сигналов открывает широкие перспективы для решения задач контроля, диагностики, идентификации, управления в различных областях промышленности и экономики;

9. предложенная технология определения статистических характеристик помехи открывает возможность значительно уменьшить погрешность оценок традиционных способов корреляционного анализа.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих научных работах:

1. Т. А. Алиев, Н. Ф. Мусаева Г. А. Гулуев, У.Э. Саттарова, Н.Э. Рзаева “Система мониторинга периода скрытого перехода компрессорной станции в аварийное состояние”, Проблемы Управления и информатики №6, 2011, 61-67. (Киев)
2. T.A. Aliev, N.F. Musaeva, G.A. Guluyev, U.E. Sattarova, N.E. Rzaeva “System of Monitoring of Period of Hidden Transition of Compressor Station to Emergency State”, Journal of automation and information sciences, Vol. 43, Issue 11, 2011, p.68-81(Нью-Йорк, **SCI**)
3. Саттарова Улькар, Рзаева Нармин, Базы данных, 2013, Azərbaycan Respublikası Təhsil Nazirliyinin 18.06. 2012 tarixli 1131 sayılı əmri ilə dərs vəsaiti kimi təsdiq olunmuşdur, Qoliaf Qroup 146 с.
4. T.A. Aliev, N.F. Musayeva, U.E. Sattarova “The Technology of Forming the Normalized Correlation Matrices of the Matrix Equations of Multidimensional Stochastic Objects”, Journal of Automation and Information Sciences, 2013, 45(1), p. 1-15. (Нью-Йорк, **SCI**)
5. Т.А.Алиев, Н.Ф.Мусаева, У.Э.Саттарова, Н.Э.Рзаева, “Система Noise мониторинга аномальных сейсмических процессов и сейсмостойкости строительных объектов”, Материалы научно-практической конференции, Оценка риска и проблемы безопасности в строительном комплексе, 25-26 апреля, 2013.
6. Т.А.Алиев, Н.Ф. Мусаева, Саттарова У.Э. “Технология формирования нормированных корреляционных матриц матричных уравнений многомерных стохастических объектов”, Проблемы Управления и Информатики, 2013, Киев, 45(1), с.56-69.
7. 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, 2013, Volume 53, Issue 1, p. 11–25, (**SCI**).

8. T.A.Aliev, A.M. Abbasov, G.A.Guluyev, F.H.Pashayev, U.E.Sattarova, Noise Technologies for Minimization of Damage from Destructive Earthquakes. SE-50EEE International Conference on Earthquake Engineering, 29 to 31, 2013, May, Skopje, (Makedoniya.)
9. Səttarova Ü.E., Rzayeva N.E., Bəşirova Z.Y. İnformasiya texnologiyaları və sistemləri, İnformasiya Texnologiyaları nəşriyyatı, 2014, Azərbaycan Respublikası Təhsil Nazirliyinin 28.02.2014 tarixli 258 sayılı əmri ilə dərs vəsaiti kimi təsdiq olunmuşdur. 139 s.
10. Səttarova Ü.E., Bəşirova Z.Y. “E-biliklərin təhsildə innovativ tətbiqi, Riyaziyyat və İKT-nin tətbiq sahələri”, Yeni tədris texnologiyaları-Mathematics and ICT application sphere.New training technologies, Beynəlxalq konfrans,II hissə-Gəncə, 2014, s.61-64.
11. Улькар Саттарова, “Noise технология нормирования корреляционных функций и матриц”, Lambert Academic Publishing, 2014-09-10, 208 с.
12. Н.Д. Абдуллаева, У.Э.Саттарова, Н.К. Абасова, Н.Э. Рзаева, “Применение современных компьютерных программ в обучении аудио видео дизайна”, XXIII международный смотр конкурс лучших квалификационных работ по архитектуре и дизайну. Инновации в архитектурном образовании, 2014, с.11-14.
13. T.A.Aliyev, N.F.Musayeva, U.E.Sattarova “Noise Technologies for Operating the System for Monitoring of the Beginning of Violation of Seismic Stability of Construction Object”, Recent Developments and New Directions in Soft Computing, 2015, Springer, p.211-218. (USA)
14. T.A.Aliyev, N.F.Musayeva, U.E.Sattarova, N.E.Rzayeva “Theoretical foundations of forming the robust correlation matrices of mathematical models of the dynamics of control objects”, Transactions of Azerbaijan National Academy of Sciences, Informatics and Control Problems, 2015, s.3-21.
15. А. М. Пашаев, А.А. Ализаде, Т. А. Алиев, А.М. Аббасов, Г. А. Гулуев, Ф.Г. Пашаев, У. Э. Саттарова “Интеллектуальная сейсмоакустическая система выявления зоны очага ожидаемого землетрясения”, Мехатроника, автоматизация, управление, 2015 №3. Том 16., с.147-158, Москва, (РИНЦ).
16. Т.А.Алиев, Н.Э.Рзаева, У.Э. Саттарова, Г.А.Гулуев, Т.А. Ализаде “Система диагностики и управления штанговых глубинно-насосных установок нефтяных скважин с

использованием робастной Noise-технологии”, Мехатроника, Автоматизация, Управление, 2015, №10.,Том 16, с.686-698. Москва, (РИНЦ).

17. Алиев Т.А., Аббасов А.М., Гулуев Г.А., Пашаев Ф.Г., Саттарова У.Э. “Разработка системы идентификации сейсмостойкости и мониторинга зарождения аномальных сейсмических процессов”, Восточно-Европейский Журнал передовых технологий, 2015, №5/4 (77), с.19-36. (**Scopus**)

18. T.A. Aliev, N.F. Musayeva, U.E. Sattarova, N.E. Rzayeva “Robust technology for forming correlation matrices of mathematical models of the dynamics of control objects”, National Academy of Sciences of Azerbaijan, Reports, 2015, p.17-24.

19. T. Aliev, N. Musayeva, U. Sattarova, N. Rzayeva “Development of the algorithms of correction of correlation matrices”, Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 2015, № 6/4 (78), с.65-82. (**Scopus**)

20. T.A. Aliev, N.F. Musayeva, A.M. Hacıyev, E.Ə. Məlikov, N.S. Əliyev, S.Ə. Əzizov, A.K. Kazımzadə, M.M. İsayev. Ü.E. Səttarova, Magistr pilləsində tədris olunan fənlərin proqramları, İnformasiya texnologiyaları və sistemləri kafedrası, 2016, 138 s.

21. T.Aliev, Q.Quluyev, F.Pashayev, U.Sattarova, N. Rzaeva “Intelligent Seismic-Acoustic System for Identifying the Location of the Areas of an Expected Earthquake”, Journal of Geoscience and Environment Protection, 2016, 4, p. 147-162. (USA)

22. 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, 2017, p.44-51. (**SCI**)

23. А.Тельман, Н. Мусаева, У. Саттарова “Способ измерения значений нормированной корреляционной функции”, Евразийское патентное ведомство, 2016, Int. Cl. G06F 17/15 (2006.01), с.3-16.(Москва)

24. Ü.E.Səttarova, Ü.N. Gözəli “Smartfonlar üçün Java proqram dilindən istifadə etməklə mobil applikasiyanın yazılması”, AMEA-nın xəbərləri, Fizika-texnika və riyaziyyat elmləri seriyası, İnformasiya və idarəetmə problemləri, 2016, №3, s.131-138.

25. U.Sattarova, “Identification of seismic stability of high-rise buildings and construction objects by correlation matrices”,

Brandenburg Technological University, 3. Ingenieurtag, Der fakultar maschinenbau, elektro-und energiesysteme gus-und osteuropatag, GUS-und Osteuropatage, Germany 2016, p-87-97, (Германия).

26. У.Саттарова, “Технология и программные средства определения корректного нормирования корреляционных функций”, Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının xəbərləri, Fizika-texnika və riyaziyyat elmləri seriyası, İnformasiya və idarəetmə problemləri, Elm- nəşriyyatı, XXXVII #3, Bakı-2017, s.89-96.

27. Sattarova U.E, “Technology and software to determine adequate normalized correlation matrices in the solution of identification problems”, Eastern European Journal of Enterprise Technologies, 2017, #6, p. 69-76. (**Scopus**).

28. Т.А.Алиев, Н.Ф.Мусаева, У.Э. Саттарова, Н.Э. Рзаева “Алгоритмы формирования корреляционных матриц, эквивалентных техническому состоянию объектов контроля” АМЕА-nın xəbərləri, Fizika-Texnika və Riyaziyyat Elmləri seriyası, İnformasiya və idarəetmə problemləri, 2017, №6, s.23-39.

29. Ulkar E.Sattarova, “Technology and Software for Calculating Correct Normalization of Correlation Functions Communications” Challenges 9, 2017 international Publishing, Springer, iP&C’2017 Bydgoszcz, Poland, September 2017, p.149-159,(Польша, **Scopus**)

30. Sattarova U.E., Akbarova Sa.M. “The reliability properties of the gas supply system”, Azərbaycan Memarlıq və İnşaat Universiteti, Elmi əsərlər, 2017, №2, cild 2, s. 52-57.

31. Sattarova U.E. “Identification of static characteristics of multidimensional objects signals through the matrix of first differences”, Azərbaycan Memarlıq və İnşaat Universiteti, Elmi əsərlər, 2017, №2, cild 2, s. 82-88.

32. U.E.Sattarova “Experimental Study of Stochastic Processes, Determining Their Characteristics and Conducting Real Experiments on the Operated Bridge”, Image Processing and Communication, An International Journal, 2017, vol.22, no 3, p.5-12. (Польша)

33.У.Э.Саттарова “Технология экспериментального исследования стохастических процессов, определение их характеристик и проведение натуральных экспериментов на эксплуатируемом мосту”, АМЕА-nın xəbərləri, Fizika-Texnika və Riyaziyyat Elmləri seriyası, 2018, №3, cild XXXVIII, s.91-101.

34. Telman Abbas Aliev, Narmin Eldar Rzaeva, Ulkar Eldar Sattarova “Development of the technology for the spectral noise control of the vibration conditions of the vibration conditions of offshore platforms” Восточно-Европейский Журнал Передовых Технологий, 2018,1/4 (91), с. 59-69. (**Scopus**)
35. U.E. Sattarova, M.E. Aliyev, T.A. Babayev, V.V. Bairamov, P.F. Pasha “Forecasting of seismic and technological processes using autoregressive moving average method”, Transaction of Azerbaijan National Academy of Sciences, Series of Physical-Technical and Mathematical Sciences: Informatics and Control Problems, 2018, vol. XXXVIII, №3, pp. 54-62.
36. Q.A.Quliyev, F.H.Paşayev, Ü.E.Səttarova, B.Ə.Süleymanlı, “Neftqazçıxarma müəssisələri obyektlərinin avtomatlaşdırılması layihələrinin qiymətləndirilməsi mənbələri”, Azərbaycan Respublikası Dövlət Neft Şirkəti, Azərbaycan Neft Təsərrüfatı jurnalı, 2018, №6.
37. Səttarova Ü.E., Əkbərova Sa.M. “Qaz boru kəmərlərinin tikintisinin texnoloji problemləri” Azərbaycan Memarlıq və İnşaat Universiteti, Elmi əsərlər, 2018, №1, s. 69-73.
38. U.Sattarova, V.Bayramov, B.Suleymanli “Data mining of signals of multidimensional technological objects using fuzzy logic”, Azərbaycan Respublikası Təhsil Nazirliyi, Nəzəri və Tətbiqi Mexanika, 2018, №1-2 (49-50), s.153-161.
39. T.A.Aliev, U.E.Sattarova, N.F.Musaeva, N.E.Rzaeva “Algorithms for forming correlation matrices equivalent to matrices of useful signals of multidimensional stochastic objects”, Applied and Computational mathematics, V.17, N.2, 2018, pp. 205-216 (**SCI**)
40. U.E.Sattarova “Reducing The Error In The Processing Of Multichannel Correlator Output Signals”, International Federation of Automation Control (IFAC), Baku 2018.

Личный вклад соискателя в трудах, опубликованных в соавторстве:

[1-10; 12-16] Построение алгоритмов, экспериментальные исследования, формирование ограничений, интерпретация данных

[16-28] Создание технологий, проведение сравнительного анализа, выводы

[30, 34-39] Постановка задачи, выбор объектов исследования, разработка альтернативных методов, выбор методов исследования, анализ полученных данных и их внедрении и применение на практике

Səttarova Ülkər Eldar qızı

**KÜYLƏNMİŞ ÇOXÖLÇÜLÜ TEXNOLOJİ PROSESLƏRİN
ROBAST KORRELYASIYALI MATRİSLƏRİNİN
FORMALAŞDIRILMASI ÜÇÜN HİBRİD NOISE
TEXNOLOGİYALARIN YARADILMASI**

Xülasə

Dissertasiya işində stoxastik proseslərin adekvat statistik xarakteristik xarakteristikalarının: qarşılıqlı və avto korrelyasiya funksiyalarının korrelyasiya əmsalının, küyün dispersiyasının və digər hesablama məsələlərinə baxılıb.

Eyni zamanda istehsalat obyektlərində küylü giriş-çıxış siqnalların korrelyasiya matrislərinin formalaşmasının çətinlikləri analizi aparılıb. Küyün xarakteristikalarının qiymətlərinin hesablanması üçün alqoritmləri və küylü təsadüfi proseslərin faydalı siqnallarının korrelyasiya matrislərinə ekvivalent korrelyasiya matrislərinin formalaşmasının texnologiyaları təklif edilmişdir. Bu zaman fasiləsiz stoxastik obyektlərin xüsusiyyətləri nəzərə alınıb. Bu alqoritmlərin tətbiq imkanları (həm klassik şərtlər ödəndiyi və ödənmədiyi hallarda ağ küy normal paylanma qanununa tabedir. Həmdə faydalı siqnal və küy arasında korrelyasiya olmayan, həm də onların arasında korrelyasiya mövcud olan hallar) üçün göstərilib.

Sattarova Ulkar Eldar

**DEVELOPMENT OF HYBRID NOISE TECHNOLOGIES OF
FORMATION OF ROBUST CORRELATION MATRICES OF
NOISY SIGNALS OF MULTIDIMENSIONAL
TECHNOLOGICAL PROCESSES**

Abstract

In dissertation difficulties of forming of correlation matrixes of noisy entrance-output signals of production objects are analyzed. Algorithms of calculation of estimates of characteristics of the noise and technology of formation of the correlation matrixes equivalent to matrixes of useful signals of noisy stochastic processes are offered. At the same time specifics of continuous stochastic linear objects are considered. The possibility of application of these algorithms as for a case when between the useful signal and the noise there is no correlation, and for a case when the correlation between them is present is shown.



**AZƏRBAYCAN MİLLİ ELMLƏR AKADEMİYASININ
İDARƏETMƏ SİSTEMLƏRİ İNSTİTUTU**

Əlyazması hüququnda

Səttarova Ülkər Eldar qızı

**KÜYLƏNMİŞ ÇOXÖLÇÜLÜ TEXNOLOJİ PROSESLƏRİN
ROBAST KORRELYASİYALI MATRİSLƏRİNİN
FORMALAŞDIRILMASI ÜÇÜN HİBRİD NOISE
TEXNOLOGİYALARIN YARADILMASI**

İxtisas: 1203.01 – Kompüter elmləri

Texnika elmləri doktoru elmi dərəcəsi almaq üçün təqdim edilmiş
dissertasiyanın

AVTOREFERATI

Elmi məsləhətçi:
texnika elmləri doktoru,
professor, akademik Telman Əliyev

BAKİ – 2018