

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Южно-Уральский государственный университет»  
(национальный исследовательский университет)  
Высшая школа электроники и компьютерных наук  
Кафедра «Информационно-измерительная техника»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ  
Заведующий кафедрой, к.т.н., доцент.  
\_\_\_\_\_/А.Л. Шестаков/  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Статистический анализ результатов измерений при натурной транспортировке изделий

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-284. ВКР

Руководитель, доц. каф. ИНИТ  
\_\_\_\_\_/ А.М.Сухарев /  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Автор  
студент группы КЭ-476  
\_\_\_\_\_/ Д.М.Приходько /  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Нормоконтроллер, доц. каф. ИНИТ  
\_\_\_\_\_/ А.С. Волосников /  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

## АННОТАЦИЯ

Приходько Д.М. Статистический анализ результатов измерений при натурной транспортировке изделий. Пояснительная записка к выпускной квалификационной работе. – Челябинск: ЮУрГУ, КЭ, 2018, 94 с., 8 ил., библиогр. список – 20 наим., 7 прил.

Работа посвящена статистическому анализу измерительной информации, полученной при натурном транспортировании макетов и узлов изделий, разрабатываемых АО «ГРЦ Макеева». В ходе работы была разработана программа, позволяющая автоматизировать процесс получения статистических таблиц по итогам обработки результатов измерений. В работе описаны основные принципы проведения испытаний на случай натурального транспортирования, приведен обзор используемых технических средств, описаны принципы сбора измерительной информации, программы обработки и методика анализа вибрационных нагрузок. Описана реализация программной части и приведены результаты работы разработанной программы.

|                  |             |                   |                |             |   |                           |             |               |
|------------------|-------------|-------------------|----------------|-------------|---|---------------------------|-------------|---------------|
|                  |             |                   |                |             | <i>КЭ-4 76.12.03.01.2018. 114-284. ВКР</i>  |                           |             |               |
| <i>Изм.</i>      | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i>   | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |   |                           |             |               |
| <i>Разраб.</i>   |             | <i>Приходько</i>  |                |             | <i>Статистический анализ результатов измерений при натурной транспортировке изделий</i> | <i>Лит.</i>               | <i>Лист</i> | <i>Листов</i> |
| <i>Провер.</i>   |             | <i>Сухарев</i>    |                |             |   |                           | <i>3</i>    | <i>94</i>     |
| <i>Рецензент</i> |             |                   |                |             |   | <i>ЮУрГУ Кафедра ИНИТ</i> |             |               |
| <i>Н. Контр.</i> |             | <i>Волосников</i> |                |             |   |                           |             |               |
| <i>Утверд.</i>   |             | <i>Шестаков</i>   |                |             |   |                           |             |               |

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |    |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....   | 6  |
| 1 ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОВЕДЕНИЯ ВИБРОИСПЫТАНИЙ.....                 | 8  |
| 2 РЕГИСТРАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ<br>ВИБРОИСПЫТАНИЯХ..... | 10 |
| 2.2.2 Обработка зарегистрированных сигналов.....                   | 13 |
| 2.2.2 Описание модуля «HISTO» .....                                | 16 |
| 2.2.3 Описание модуля «SKO_TABLEM».....                            | 35 |
| 2.2.4 Описание программы «SPM» .....                               | 39 |
| 2.2.5 Описание программы «PIC_TABLEM» .....                        | 41 |
| 2.3 Методика обработки измерительной информации .....              | 44 |
| 2.3.1 Общие положения.....   | 44 |
| 2.3.2 Выбор стационарных участков движения.....                    | 45 |
| 2.3.3 Обработка стационарных участков.....                         | 47 |
| 2.3.4 Спектральные характеристики процессов ускорений .....        | 52 |
| 2.3.6 Передаточные функции для процессов ускорений .....           | 53 |
| 2.3.7 Анализ нагрузок при нестационарных режимах движения .....    | 54 |
| 3 РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ «Max_Sko» .....                                | 55 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....  | 60 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....                                     | 61 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А.....  | 64 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....   | 68 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В.....  | 73 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Г .....   | 74 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....  | 78 |

|      |      |          |         |      |                                     |      |
|------|------|----------|---------|------|-------------------------------------|------|
|      |      |          |         |      | КЭ-4 76.12.03.01.2018. 114-284. ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                                     | 3    |

|                    |    |
|--------------------|----|
| ПРИЛОЖЕНИЕ Е ..... | 84 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Ж ..... | 90 |

|             |             |                 |                |             |  |             |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|--|-------------|
|             |             |                 |                |             | <i>КЭ-4 76.12.03.01.2018. 114-284. ВКР</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |  | 4           |

## СОКРАЩЕНИЯ

АО– акционерное общество;

ГРЦ– Государственный ракетный центр

СПМ – спектральная плотность мощности

СКО – среднеквадратическое отклонение;

МО – математическое ожидание;

ЮУрГУ – Южно-Уральский Государственный университет.

|             |             |                 |                |             |  |             |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|--|-------------|
|             |             |                 |                |             | <i>КЭ-4 76.12.03.01.2018. 114-284. ВКР</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |  | <i>5</i>    |

## ВВЕДЕНИЕ

Специфика изделий, разрабатываемых АО «ГРЦ Макеева» обуславливает повышенные требования к надежности этих изделий, поскольку они, как правило, работают при комплексе внешних воздействий. Соотношение между степенью жесткости этих воздействий и уровнем прочности, устойчивости, стабильности и другими характеристиками изделий является одним из факторов, определяющих их способность нормально функционировать, безотказно выполнять заданные функции в течение определенного промежутка времени.

В комплексе внешних воздействий можно выделить следующие составляющие: вибрационная подсреда, акустическая подсреда и климатическая подсреда. При этом отдельное и независимое рассмотрение влияния этих подсред на объект испытаний справедливо только для линейных систем. Однако обширные и важные результаты, получаемые при таком линейном подходе достаточно убедительно обосновывают его правомерность.

Наиболее значительное количество отказов аппаратуры, установленной на различного рода подвижных объектах, вызывается воздействием интенсивных механических вибраций. Следовательно, важнейшими являются вибрационные испытания, позволяющие выявить наличие механических дефектов, определить динамические характеристики испытываемых изделий, произвести оценку конструктивных факторов и проверить стабильность заданных параметров изделия при воздействии вибрации.

При экспериментальной отработке изделий, разрабатываемых АО «ГРЦ Макеева», проводятся стендовые, лабораторные испытания путем формирования вибраций, подобных натурным. Однако существенным недостатком данного метода является то, что при этом возможно воспроизведение только стационарной случайной вибрации или, в крайнем случае, сравнительно медленное изменение параметров стационарной вибрации. Реальный же процесс не является стационарным и на отдельных временных интервалах его характеристики могут изменяться

|             |             |                 |                |             |   |             |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|---|-------------|
|             |             |                 |                |             | <i>КЭ-476.12.03.01.2018. 114-284. ВКР</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |   | <i>6</i>    |

очень быстро. Поэтому, как важная часть программы поиска неисправностей и оценки технического состояния исследуемых объектов, наряду с моделированием внешних воздействий на объект в лабораторных условиях, проводятся испытания узлов и макетов разрабатываемых изделий на случай натурального транспортирования, целью которых является оценка механических нагрузок (вибрационных и квазистатических), действующих на составные части макетов в ходе их транспортирования к месту пуска.

Целью работы является автоматизация получения сводных таблиц по характеристикам нагрузок на изделие при натурном транспортировании, что позволит минимизировать влияние человеческого фактора (ошибок оператора) на процесс статистического анализа результатов измерений. Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие задачи:

1. Рассмотрение основных принципов проведения вибрационных испытаний;
2. Ознакомление с используемыми техническими средствами;
3. Изучение методики обработки результатов измерений, ее математического аппарата и используемого программного обеспечения;
4. Выполнение первичной обработки измерительной информации;
5. Разработка алгоритма автоматизации статистической обработки результатов измерений;
6. Программная реализация и практическое применение разработанного алгоритма.

|             |             |                 |                |             |  |             |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|--|-------------|
|             |             |                 |                |             | <i>КЭ-4 76.12.03.01.2018. 114-284. ВКР</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |  | <i>7</i>    |

# 1 ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОВЕДЕНИЯ ВИБРОИСПЫТАНИЙ

Вибрационная диагностика – метод диагностирования технических систем и оборудования, основанный на анализе параметров вибрации, либо создаваемой работающим оборудованием, либо являющейся вторичной вибрацией, обусловленной структурой исследуемого объекта.

Предпосылкой к широкому применению вибрационных испытаний послужил тот факт, что в связи с потребностью в работе на высоких скоростях и применением легких конструкций в современном оборудовании статические испытания на сжатие/растяжение не являются достаточными, возникает необходимость динамических измерений.

Процесс вибродиагностики включает в себя следующие этапы:

1. сбор данных;
2. регистрация данных;
3. вычисление информативных параметров;
4. определение технического состояния объекта.

На объекте в контрольных точках закрепляют датчики, которые через согласующие усилители подключаются к регистрирующей аппаратуре. После регистрации данных производится вычисление диагностических параметров. В качестве таковых используются разнообразные параметры вибрации, параметры случайного процесса изменения вибрации, специальные функции параметров вибрации (например, полусумма и полуразность оборотной вибрации в двух выбранных точках, отношение некоторых параметров вибрации в разных направлениях). В ряде случаев необходимо измерять и учитывать невибрационные параметры, влияющие на вибрацию.

Количественные и качественные характеристики значений диагностических параметров и их изменений, характерные для некоторого дефекта, являются признаками этого дефекта.

|             |             |                 |                |             |  |             |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|--|-------------|
|             |             |                 |                |             | <i>КЭ-4 76.12.03.01.2018. 114-284. ВКР</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |  | <i>8</i>    |



В данной главе были рассмотрены основные принципы проведения вибрационных испытаний проводимых на АО «ГРЦ Макеева».

|             |             |                 |                |             |   |             |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|---|-------------|
|             |             |                 |                |             | <i>КЭ-476.12.03.01.2018. 114-284. ВКР</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |   | <i>9</i>    |

## 2 РЕГИСТРАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ВИБРОИСПЫТАНИЯХ

При проведении рассматриваемых в настоящей работе испытаний выполнялись измерения вибрационных ускорений элементов транспортного агрегата, опор и креплений перевозимых составных частей макета в точках и направлениях, определяемых программой и методикой испытаний, а также скорости движения поезда.[4]

Схема расстановки датчиков представлена на рисунке 2.1.

|             |             |                 |                |             |  |             |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|--|-------------|
|             |             |                 |                |             | <i>КЭ-4 76.12.03.01.2018. 114-284. ВКР</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |  | <i>10</i>   |

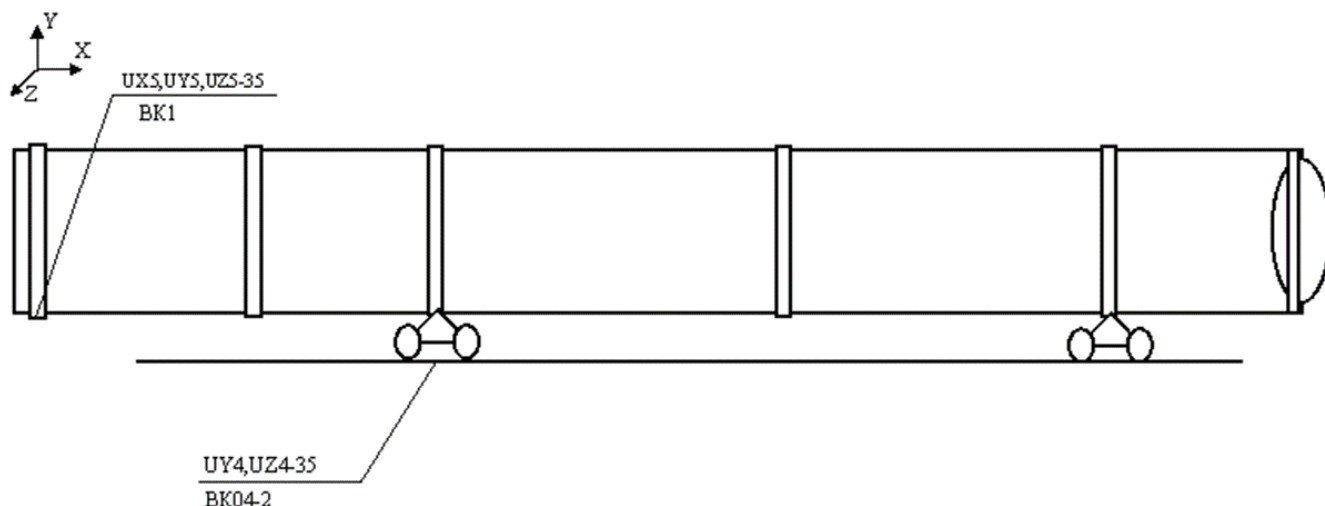


Рисунок 2.1 – Схема расстановки датчиков

Измерения вибрационных ускорений и скорости движения агрегатов выполняются одновременно. Измерения и регистрация скорости на всем маршруте доставки изделий должны проводиться с целью получения статистических данных по закону распределения скорости и определения зависимости вибрационных нагрузок от скорости движения транспортного агрегата.[8]

|             |             |                 |                |             |  |             |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|--|-------------|
|             |             |                 |                |             | <i>КЭ-4 76.12.03.01.2018. 114-284. ВКР</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |  | 11          |

Измеряемые виброускорения преобразуются в электрический сигнал с напряжением в диапазоне  $\pm 5$  В, пропорциональный линейному ускорению акселерометрами линейных ускорений АТ-1105-2А и АТ-1105-10А с диапазонами измерений  $\pm 2g$  и  $\pm 10g$  соответственно. Измерение виброускорений осуществляется в полосе частот от 0,5 до 200 Гц с частотой дискретизации 1200 Гц. Краткие характеристики акселерометров приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Краткие характеристики акселерометров АТ-1105

| Наименование параметра   | Тип датчика      |               |
|--|------------------|---------------|
|  | АТ-1105-2А       | АТ-1105-10А   |
| Электропитание от источника постоянного тока относительно средней точки, В                                     | $\pm 12 \pm 1.2$ |               |
| Диапазон измерения, м/с <sup>2</sup> (g)   | 19.6 (2.0)       | 98.1 (10)     |
| Чувствительность при температуре $21 \pm 4^\circ\text{C}$ , мВ/g   | $2500 \pm 12.5$  | $500 \pm 2.5$ |
| Температурное изменение чувствительности в диапазоне $+21^\circ\text{C} \dots +60^\circ\text{C}$ , не более, % | $\pm 0.5$        |               |
| Частотная характеристика:<br>- нижняя частота, Гц<br>- верхняя частота, Гц                                     | 0<br>300         | 0<br>700      |
| Нелинейность крутизны выходной характеристики, не более, % от измеряемого значения                             | 0.5              |               |
| Диапазон рабочих температур, $^\circ\text{C}$  | -50...+60        |               |
|  |                  |               |

Измерительные сигналы от акселерометров поступают по кабелям на регистрирующую аппаратуру, установленную в кабине автотягача. Регистрация процессов осуществляется в цифровом виде с помощью многоканального измерительного усилителя MGCplus фирмы НВМ (Германия) на жесткий диск переносного компьютера. Краткие характеристики усилителя MGCplus представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Краткие характеристики измерительного усилителя MGCplus

| Наименование параметра                  | Тип измерительного модуля ML801B + AP801 |
|---|--|
| Количество измеряемых каналов на модуль | 8  |
| Диапазон измеряемых частот, кГц         | 0...1                                    |
| Эффективное разрешение, бит             | 20                                       |
| Входной диапазон, В                     | ±10.5                                    |
| Класс точности                          | 0.05                                     |
| Нелинейность, %                         | < 0.03                                   |

Временные реализации зарегистрированных процессов представляют из себя кадры длительностью 600 секунд с частотой дискретизации 600 Гц и фильтрацией от 0.5 Гц до 100 Гц для вибрационных процессов и 0 – 20 Гц для квазистатических процессов.

### 2.2.1 Обработка зарегистрированных сигналов.

Обработка результатов измерений выполняется в программном комплексе Ritm. Пакет Ritm представляет собой систему сбора, обработки и отображения данных. На его основе можно строить законченные виртуальные приборы, системы регистрации характеристик объектов, системы управления, автоматизированные рабочие места операторов для обслуживания технических процессов или проведения испытаний объектов.

Комплекс Ritm решает следующие задачи:

1. Регистрация данных с различных видов аппаратуры.
2. Обработка данных с использованием различных алгоритмов. Обработка может вестись в реальном времени и по завершении эксперимента.
3. Вывод результатов обработки в виде графиков, таблиц, отчетов, файлов данных различных форматов.

4. Хранение данных по экспериментам. По результатам эксперимента сохраняются файлы зарегистрированных данных, файлы с обработанными данными, отчеты, протоколы работы и задания на регистрацию и обработку данных.

Ritm представляет собой единую законченную систему, построенную по модульному принципу. В состав системы входит базовая программа и набор подключаемых модулей. Для обеспечения функционирования системы разработаны форматы данных и протоколы обмена данными внутри системы.

Пакет ориентирован на автоматизацию всех решаемых задач. Использование заданий на обработку, регистрацию, представление данных, а также расширенные возможности конфигурации интерфейса позволяют эффективно регистрировать, обрабатывать, представлять и хранить большие объемы данных. Система ориентирована на скоростную обработку больших объемов информации с большого количества измерительных каналов. В системе реализован внутренний макроязык.

В составе комплекса можно выделить систему обработки данных, подсистемы регистрации данных и обработки в реальном времени, средства отображения данных в виде графиков, таблиц и мнемосхем.

Система обеспечивает проведение обработки на всех этапах анализа данных: измерение и первичную обработку; получение спектральных характеристик, корреляционных функций, частотных характеристик линейных систем и статистических оценок.

#### **Базовая программа**

Функции базовой программы:

1. Несет в себе основной интерфейс пользователя, включает в себя окна для просмотра графиков, текстовой информации, редактор заданий и другие элементы. Внешний вид программы настраивается в широких пределах с помощью файлов конфигурации.

2. Организует подключение и вызов модулей регистрации и обработки.

|             |             |                 |                |             |  |             |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|--|-------------|
|             |             |                 |                |             | <i>КЭ-4 76.12.03.01.2018. 114-284. ВКР</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |  | <i>14</i>   |

3. Является основой для взаимодействия подключенных модулей, предоставляет единую среду данных для модулей.

4. Реализует механизмы регистрации данных, обработки в реальном времени в процессе регистрации, обработки данных после завершения эксперимента.

5. Исполняет задания на встроенном макроязыке.

Основные элементы базовой программы:

1. Интерфейс пользователя. Окна графиков, текстовый редактор, панель инструментов, дерево ресурсов, строка состояния, панели для мнемосхем эксперимента.

2. Механизм поиска и вызовов на исполнение подключаемых модулей.

3. Механизм исполнения заданий на макроязыке.

4. Механизм организации буферов данных.

5. Механизм организации общих переменных системы.

6. Механизм организации регистрации с обработкой в реальном времени с использованием нескольких программных потоков.

7. Набор внутренних команд, интегрированных в макроязык.

#### **Подключаемые модули**

Подключаемые модули могут иметь собственную интерфейсную часть или использовать интерфейс базовой программы или выполняться полностью в фоновом режиме.

Группы модулей:

1. Модули регистрации. Модули для взаимодействия с измерительной аппаратурой и получения данных. Для работы используют задания на регистрацию, построенные на общих принципах для разных модулей и аппаратуры. Выдают данные для других модулей и базовой программы в унифицированном формате, что позволяет абстрагироваться при обработке данных от измерительной части и одинаково обрабатывать данные полученные с разной аппаратуры.

|             |             |                 |                |             |  |             |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|--|-------------|
|             |             |                 |                |             | <i>КЭ-4 76.12.03.01.2018. 114-284. ВКР</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |  | 15          |

2. Модули обработки. Большая группа модулей, выполняющих различные функции по обработке данных различными методами, а также сервисные и вспомогательные модули.

Система обеспечивает обработку широкого класса процессов:

- случайные стационарные сигналы;
- нестационарные импульсные процессы
- гармонические процессы;
- смешанные процессы.

Обработка данных включает:

- быстрое преобразование Фурье;
- цифровую фильтрацию;
- получение ударного спектра;
- процедуры для исключения смещение нуля процесса;
- получение оценок плотности вероятности и распределения мгновенных и пиковых значений процесса;
- получение спектральной плотности мощности, взаимной спектральной мощности и функции когерентности;
- получение корреляционной и взаимно корреляционной функций.

В рамках данной дипломной работы были использованы следующие модули обработки данных:

1. Histo
2. Sko\_tablem
3. SPM
4. Pik\_tablem
5. Max\_Sko

### 2.2.2 Описание модуля «HISTO»

|             |             |                 |                |             |  |             |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|--|-------------|
|             |             |                 |                |             | <i>КЭ-4 76.12.03.01.2018. 114-284. ВКР</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |  | 16          |



Модуль «Histo» представляет собой динамически присоединяемую библиотеку (DLL) для системы регистрации и обработки измерительной информации «Ritm». Входными данными служат массивы, подготовленные в системе «Ritm». Программа разработана в среде Delphi.

Данный модуль обработки предназначен для получения плотности вероятности мгновенных и пиковых значений случайного процесса и характеристик на их основе и сопоставления результатов с характеристиками случайного Гауссова процесса.[5]

Алгоритм процедуры расчета пик факторов представлен в блок схеме на рисунке 2.2.2.1.

|             |             |                 |                |             |   |             |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|---|-------------|
|             |             |                 |                |             | <i>КЭ-476.12.03.01.2018. 114-284. ВКР</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |   | <i>17</i>   |

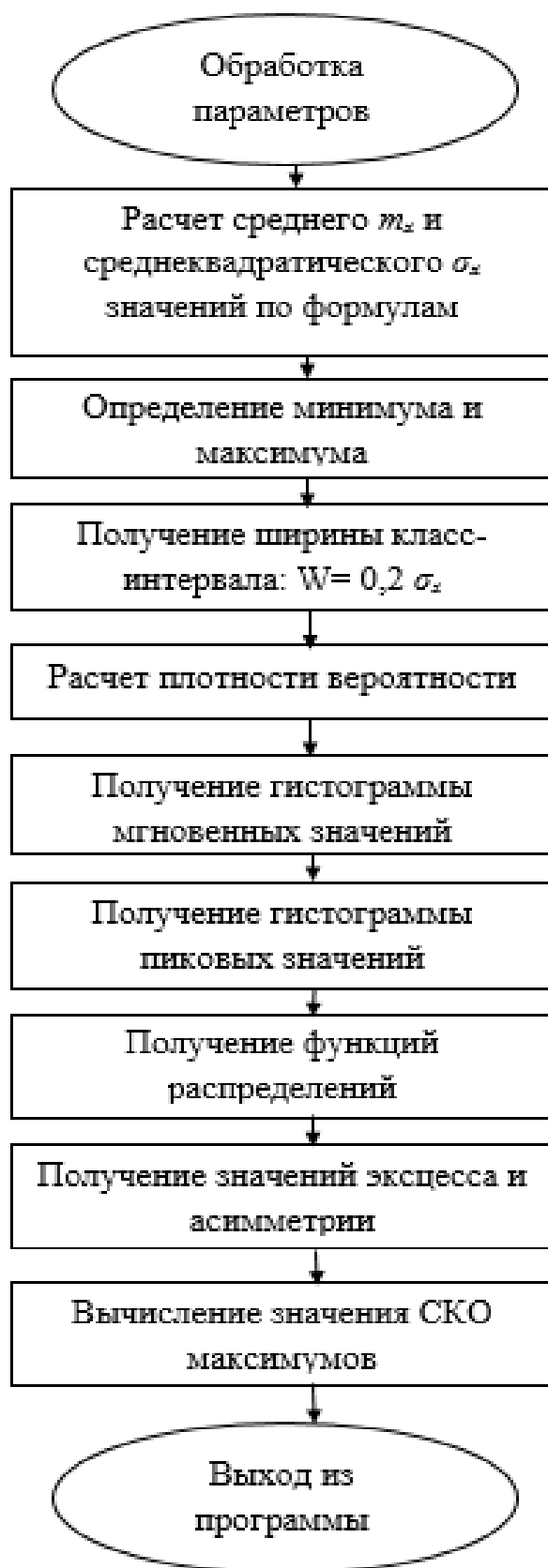


Рисунок 2.2.2.1 – Блок схема программы «Histo»

В силу того, что реализацию случайного процесса нельзя задать явной математической формулой, для оценки свойств таких данных должны использоваться статистические методы. Одной из основных статических характеристик, имеющих важное значение для описания свойств стационарных случайных процессов является плотность вероятности. Плотность вероятности  $p(x)$  стационарной реализации задает скорость изменения вероятности в зависимости от значения реализации. Функция  $p(x)$  обычно оценивается путем вычисления вероятности того, что мгновенное значение отдельной реализации заключено в узком интервале, центр которого пробегает область значений процесса, с последующим делением на ширину интервала. Общая площадь, ограниченная графиком плотности вероятности по всей его области определения, равна единице, что свидетельствует о достоверности события, заключающегося в том, что значения реализации содержатся между  $-\infty$  и  $+\infty$ . Часть этой площади, лежащая левее данного значения  $x$ , определяет функцию распределения  $P(x)$ [6].

Пусть  $x(k)$  – некоторая случайная величина. Тогда для любого фиксированного значения  $x$  случайное событие  $x(k) \leq x$  определяется как множество всех возможных исходов  $k$  таких, что  $x(k) \leq x$ . Функция распределения  $P(x)$  определяется как вероятность, приписанная множеству точек  $k$ , удовлетворяющих неравенству  $x(k) \leq x$ . Заметим, что множество точек  $k$ , удовлетворяющих неравенству  $x(k) \leq x$ , является подмножеством совокупности точек, которые удовлетворяют неравенству  $x(k) \leq \infty$ . Формально

$$P(x) = P[x(k) \leq x]. \quad (1)$$

Очевидно, что

$$P(a) \leq P(b) \text{ при } a \leq b, \quad (2)$$

|             |             |                 |                |             |  |             |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|--|-------------|
|             |             |                 |                |             | <i>КЭ-4 76.12.03.01.2018. 114-284. ВКР</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |  | 19          |

$$P(-\infty) = 0, \quad P(\infty) = 1. \quad (3)$$

Если область значений случайной величины непрерывна, что и предполагается в дальнейшем, то плотность вероятности  $p(x)$  определяется дифференциальным соотношением

$$p(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left[ \frac{P[x < x(k) \leq x + \Delta x]}{\Delta x} \right]. \quad (4)$$

Следовательно,

$$P(x) \geq 0, \quad (5)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx = 1, \quad (6)$$

$$P(x) = \int_{-\infty}^x p(\xi) d\xi, \quad \frac{dP(x)}{dx} = p(x). \quad (7)$$

Точно определить характеристики случайных величин по выборочным данным невозможно. По выборке конечной длины можно найти лишь оценки параметров. Рассмотрим задачу оценивания плотности вероятности отдельной реализации  $x(t)$  стационарного эргодического случайного процесса  $\{x(t)\}$ . Вероятность того, что ордината  $x(t)$  примет некоторое значение в интервале от  $x-W/2$  до  $x+W/2$  за время  $T$ , можно оценить выражением

$$\hat{P}[x, W] = \frac{1}{T} \sum_i \Delta t_i = \frac{T_x}{T}, \quad (8)$$

|             |             |                 |                |             |  |             |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|--|-------------|
|             |             |                 |                |             | <i>КЭ-4 76.12.03.01.2018. 114-284. ВКР</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |  | 20          |

где  $W$  – узкий интервал, симметричный относительно точки  $x$ ,  $T_x$  – промежуток времени, в течение которого ординаты  $x(t)$  находятся в пределах указанного интервала при  $i$ -м попадании в этот интервал;  $T_x = \sum \Delta t_i$ . Отношение  $T_x/T$  представляет собой суммарную долю времени, в течение которого ординаты  $x(t)$  находятся в интервале  $[x-W/2, x+W/2]$ . Следует отметить, что величина  $T_x$  обычно зависит от ординаты  $x$ . Оценка вероятности  $\hat{P}[x, W]$  стремится к истинной вероятности  $P[x, W]$  при  $T \rightarrow \infty$ . Кроме того, она является несмещенной оценкой истинной вероятности. Следовательно,

$$P[x, W] = M[\hat{P}[x, W]] = \lim_{T \rightarrow \infty} \hat{P}[x, W] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{T_x}{T}, \quad (9)$$

где  $M[\ ]$  – математическое ожидание выражения в скобках.

Одномерная плотность вероятности равна,

$$p(x) = \lim_{W \rightarrow 0} \frac{P[x, W]}{W} = \lim_{\substack{T \rightarrow \infty \\ W \rightarrow 0}} \frac{\hat{P}[x, W]}{W} = \lim_{\substack{T \rightarrow \infty \\ W \rightarrow 0}} \hat{p}(x), \quad (10)$$

где

$$\hat{p}(x) = \frac{\hat{P}[x, W]}{W} = \frac{T_x}{TW}. \quad (11)$$

есть выборочная оценка величины  $p(x)$ .

Рассмотрим  $N$  значений  $\{x_n\}$  ( $n=1, 2, \dots, N$ ) преобразованной реализации  $x(t)$  стационарного случайного процесса с нулевым средним значением  $x$ . Согласно уравнениям (4) и (11), плотность вероятности функции  $x(t)$  можно оценить в виде

$$\hat{p}(x) = \frac{N_x}{NW}, \quad (12)$$

где  $N_x$  – число значений реализации, попадающих в интервал  $x \pm W/2$ . Таким образом, численную оценку плотности вероятности  $\hat{p}(x)$  находят путем разбиения всего диапазона значений функции  $x$  на соответствующее число равных по величине интервалов, табулирования величин  $x$  по интервалам и делением на ширину интервала  $W$  и объем выборки  $N$ . Заметим, что выборочное среднее значение и дисперсия для данной последовательности  $N$  преобразованных значений  $x_n$  определяются однозначно. Однако выборочная плотность распределения  $\hat{p}(x)$  находится неоднозначно, поскольку она зависит от выбора конечных точек интервала  $[a, b]$  диапазона изменений  $x$  и от выбора числа разрядов  $K$ , на которые разбивается интервал  $[a, b]$ . При изменении  $a$ ,  $b$  и  $K$  плотность распределения также изменится. Это обусловлено принятым способом расчета выборочной плотности распределения, который состоит в табулировании числа случаев, когда значение переменной  $x$  попадает внутрь (вне) каждого из  $K$  разрядов, на которые разбит интервал  $[a, b]$ .

При хранении измеренной информации в целых числах, полученных при аналогово-цифровом преобразовании, было бы удобно использовать в качестве разряда для получения гистограмм единицы АЦП. Однако в пакете обработки «Ritm» информация хранится в формате с плавающей запятой, пересчитанная с учетом масштабных коэффициентов. Поэтому в данной методике ширина одного разряда рассчитывается исходя из значений обрабатываемых данных.

Пусть  $K$  – число интервалов, которые охватывают весь диапазон  $[a, b]$  изменения функции. Ширина каждого интервала

$$W = \frac{b - a}{K}, \quad (13)$$

|             |             |                 |                |             |  |             |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|--|-------------|
|             |             |                 |                |             | <i>КЭ-4 76.12.03.01.2018. 114-284. ВКР</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |  | 22          |

а верхняя граница  $i$ -го интервала равна

$$d_i = a + iW, \quad i = 0, 1, 2, \dots, K. \quad (14)$$

Заметим, что  $d_0=a$  и  $d_K=b$ . Определим последовательность из  $K+2$  чисел  $\{N_i\}$  ( $i=0, 1, 2, \dots, K+1$ ) из условий

$N_0$  = число значений  $x$ , удовлетворяющих неравенству  $x \leq d_0$ ;

$N_1$  = число значений  $x$ , удовлетворяющих неравенству  $d_0 < x \leq d_1$ ;

.....

$N_i$  = число значений  $x$ , удовлетворяющих неравенству  $d_{i-1} < x \leq d_i$ ;

.....

$N_K$  = число значений  $x$ , удовлетворяющих неравенству  $d_{K-1} < x \leq d_K$ ;

$N_{K+1}$  = число значений  $x$ , удовлетворяющих неравенству  $d_K < x \leq d_{K+1}$ .

В результате  $N$  значений последовательности  $x$  будут отсортированы таким образом, что последовательность чисел  $\{N_i\}$  будет удовлетворять условию

$$N = \sum_{i=0}^{K+1} N_i. \quad (15)$$

Один из способов выполнения этой сортировки на ЭВМ состоит в рассмотрении последовательных значений  $x_n$  ( $n=1, 2, \dots, N$ ) следующим образом:

1. Если  $x_n \leq a$ , то прибавить единицу к  $N_0$ .
2. Если  $a < x_n \leq b$ , то вычислить  $I = (x_n - a) / W$ . Затем выбрать  $i$  как наибольшее целое число, меньшее или равное  $I$ , и прибавить единицу к  $N_i$ .
3. Если  $x_n > b$ , прибавить единицу к  $N_{K+1}$ .

Последовательность  $\{N_i\}$  может быть представлена в четырех различных итоговых формах:

1. Гистограмма – последовательность  $\{N_i\}$  без изменений.

2. Выборочные процентные значения процесса в каждом интервале:

$$\hat{P}_i = P[d_{i-1} < x \leq d_i] = \frac{N_i}{N}, \quad i = 1, 2, \dots, K + 1. \quad (16)$$

3. Последовательность выборочных значений плотности вероятности  $\{p_i\}$ :

4.

$$\hat{p}_i = \frac{\hat{P}_i}{W} = \frac{N_i}{NW}, \quad i = 1, 2, \dots, K. \quad (17)$$

5. Последовательность выборочных значений функции распределения  $\{\hat{P}(i)\}$ , определенных для концевых точек интервалов в виде:

$$\hat{P}(i) = P[-\infty < x \leq d_i] = \sum_{j=0}^i \hat{P}_j = W \sum_{j=0}^i \hat{p}_j. \quad (18)$$

При этом оценки плотности вероятности обычно ищут при ширине интервала  $W \leq 0,2\sigma_x$ , где  $\sigma_x$  – среднеквадратическое отклонение. Отметим, что последовательность  $\hat{P}(i)$  находится несколько иначе, чем  $\hat{P}_i$ . Заметим также, что  $\hat{P}(K + 1) = 1$ , так что необходимо рассчитывать  $\hat{P}(i)$  только для  $K + 1$  концевых точек, начиная с  $a$  и кончая  $b$ .

Всякое соотношение, устанавливающее связь между возможными значениями случайной величины и соответствующими им вероятностями называется законом распределения случайной величины. Каждый закон распределения представляет собой некоторую функцию, и указание этой функции полностью описывает случайную величину с вероятностной точки зрения.

|      |      |          |         |      |                                    |      |
|------|------|----------|---------|------|------------------------------------|------|
|      |      |          |         |      | КЭ-476.12.03.01.2018. 114-284. ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                                    | 24   |



Помимо закона распределения большое практическое значение имеют числовые характеристики случайной величины, позволяющие выразить в сжатой форме наиболее существенные особенности распределения. Среди числовых характеристик выделяют так называемые *характеристики положения*, указывающие некоторое среднее, ориентировочное значение, около которого группируются все возможные значения случайной величины, и ряд характеристик, каждая из которых описывает то или иное свойство распределения. В качестве таких характеристик чаще всего применяются так называемые *моменты*.

Из характеристик положения в теории вероятностей важнейшую роль играет *математическое ожидание*, характеризующее центр рассеяния случайной величины. Математическим ожиданием случайной величины называется сумма произведений всех возможных значений случайной величины на вероятности этих значений:

$$m_x = M[X] = \sum_{i=1}^n x_i p_i. \quad (19)$$

Среди моментов наибольшее применение на практике нашли два вида: начальные и центральные. В качестве характеристик случайной величины чаще всего применяются первый начальный момент и второй центральный момент.

*Начальным моментом s-го порядка* прерывной случайной величины  $X$  называется сумма вида:

$$\alpha_s[X] = \sum_{i=1}^n x_i^s p_i. \quad (20)$$

Для непрерывной случайной величины  $X$  начальным моментом  $s$ -го порядка называется интеграл

$$\alpha_s[X] = \int_{-\infty}^{\infty} x^s f(x) dx. \quad (21)$$

Заметим, что введенная выше основная характеристика положения – математическое ожидание – представляет собой не что иное, как *первый начальный момент* случайной величины  $X$ . Тогда, пользуясь знаком математического ожидания, можно записать общее определение начального момента  $s$ -го порядка, справедливое как для прерывных, так и для непрерывных величин:

$$\alpha_s[X] = M[X^s], \quad (22)$$

То есть начальным моментом  $s$ -го порядка случайной величины  $X$  называется математическое ожидание  $s$ -й степени этой случайной величины.

Введем понятие центрированной случайной величины. Пусть имеется случайная величина  $X$  с математическим ожиданием  $m_x$ . Центрированной случайной величиной, соответствующей величине  $X$ , называется отклонение случайной величины  $X$  от ее математического ожидания:

$$X_{ц} = X - m_x. \quad (23)$$

Нетрудно убедиться, что математическое ожидание центрированной случайной величины равно нулю. Центрирование случайной величины, очевидно, равносильно переносу начала координат в среднюю, «центральную» точку, абсцисса которой равна математическому ожиданию. Моменты центрированной случайной величины носят название центральных моментов. Таким образом, *центральным моментом порядка  $s$*  случайной величины  $X$  называется математическое ожидание  $s$ -й степени соответствующей центрированной случайной величины:

|             |             |                 |                |             |  |             |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|--|-------------|
|             |             |                 |                |             | <i>КЭ-4 76.12.03.01.2018. 114-284. ВКР</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |  | 26          |

$$\mu_s[X] = M[X_{ц}^s] = M[(X - m_x)^s]. \quad (24)$$

Для прерывной случайной величины  $s$ -й центральный момент выражается суммой

$$\mu_s = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^s p_i, \quad (25)$$

а для непрерывной – интегралом

$$\mu_s = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^s f(x) dx. \quad (26)$$

Очевидно, для любой случайной величины центральный момент первого порядка равен нулю, так как математическое ожидание центрированной случайной величины равно нулю.

Второй центральный момент называется *дисперсией*  $D_x$  случайной величины. Согласно определению центрального момента,

$$\mu_2 = D_x = D[X] = M[X_{ц}^2], \quad (27)$$

т.е. дисперсией случайной величины  $X$  называется математическое ожидание квадрата соответствующей центрированной величины. Заменяя в (28) величину  $X_{ц}$  ее выражением, получим:

$$D_x = M[(X - m_x)^2]. \quad (28)$$

|      |      |          |         |      |                                     |      |
|------|------|----------|---------|------|-------------------------------------|------|
|      |      |          |         |      | КЭ-4 76.12.03.01.2018. 114-284. ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                                     | 27   |

Для непосредственного вычисления дисперсии служат формулы:

$$D_x = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2 p_i, \quad (29)$$

$$D_x = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^2 f(x) dx \quad (30)$$

– соответственно для прерывных и непрерывных величин.

Дисперсия случайной величины есть характеристика рассеивания, разбросанности значений случайной величины около ее математического ожидания. Дисперсия случайной величины имеет размерность квадрата случайной величины; для наглядной характеристики рассеивания удобнее пользоваться величиной, размерность которой совпадает с размерностью случайной величины. Для этого из дисперсии извлекают квадратный корень. Полученная величина называется *средним квадратическим отклонением (СКО)* случайной величины  $X$ :

$$\sigma_x = \sigma[X] = \sqrt{D_x}. \quad (31)$$

Математическое ожидание  $m_x$  и дисперсия  $D_x$  характеризуют наиболее важные черты распределения: его положение и степень разбросанности. Для более подробного описания распределения применяются моменты высших порядков.

Третий центральный момент служит для характеристики асимметрии («скошенности») распределения. Если распределение симметрично относительно математического ожидания, то все моменты нечетного порядка равны нулю. Естественно поэтому в качестве характеристики асимметрии распределения выбрать какой-либо из нечетных моментов. Простейший из них есть третий центральный

момент. Он имеет размерность куба случайной величины; чтобы получить безразмерную характеристику, третий момент  $\mu_3$  делят на куб среднего квадратического отклонения.[6] Полученная величина носит название «коэффициента асимметрии» или просто «асимметрии»; обозначим ее  $Sk$  :

$$Sk = \frac{\mu_3}{\sigma^3}. \quad (32)$$

Четвертый центральный момент служит для характеристики «крутости», т.е. островершинности или плосковершинности распределения. Эти свойства распределения описываются с помощью так называемого эксцесса. Эксцессом случайной величины  $X$  называется величина[6]

$$Ex = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3. \quad (33)$$

Поскольку вибрационное состояние изделия можно рассматривать, как суперпозицию различных случайных процессов, порождаемых статистически независимыми источниками, то, в соответствии с центральной предельной теоремой, при организации вибрационных испытаний принимают гипотезу о том, что используемый случайный сигнал, подчиняется нормальному закону распределения, также называемому законом Гаусса.[6]

Нормальный закон распределения характеризуется плотностью вероятности вида:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}, \quad (34)$$

где  $m$  – математическое ожидание,  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение величины  $X$ . Центральные моменты нормального распределения рассчитываются по формуле:

$$\mu_s = (s - 1)\sigma^2 \mu_{s-2}, \quad (35)$$

представляющей собой простое рекуррентное соотношение, позволяющее выражать моменты высших порядков через моменты низших порядков. Так как  $\mu_1 = 0$ , то, согласно формуле (35), все нечетные моменты нормального распределения равны нулю. Следовательно, коэффициент асимметрии нормального распределения, вычисляемый по формуле (32), также равен нулю. Для четных  $s$ , учитывая, что нулевой момент любой случайной величины представляет собой математическое ожидание нулевой степени этой величины и соответственно равен единице, по формуле (35) получим следующие выражения:

$$\begin{aligned} \mu_2 &= \sigma^2, \\ \mu_4 &= 3\sigma^4. \end{aligned} \quad (36)$$

Тогда, в соответствии с формулой (33), эксцесс нормального распределения равен:

$$Ex = \frac{3\sigma^4}{\sigma^4} - 3 = 0. \quad (37)$$

При исследовании процесса накопления повреждений важную роль играет изучение максимальных (минимальных) значений случайного процесса.

Предельным распределением экстремальных значений узкополосного гауссова случайного сигнала  $x(t)$  при стремлении ширины полосы сигнала к нулю

|             |             |                 |                |             |  |             |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|--|-------------|
|             |             |                 |                |             | <i>КЭ-4 76.12.03.01.2018. 114-284. ВКР</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |  | 30          |

служит распределение Релея, плотность вероятности которого определяется по формуле:

$$p(x) = \frac{x}{c^2} e^{-\frac{x^2}{2c^2}}, \quad x \geq 0, \quad (38)$$

где  $c$  – постоянная; в остальных случаях  $p=0$ .

По плотности вероятности максимумов определяется параметр структуры случайного процесса, который вычисляется по формуле

$$G = \frac{S_{ms} \cdot n_{ms}}{S_m \cdot n_m} \cdot pf, \quad (39)$$

где  $S_{ms}$  – СКО максимумов, лежащих выше уровня СКО процесса,

$n_{ms}$  – число максимумов, лежащих выше уровня СКО процесса,

$S_m$  – СКО максимумов,

$n_m$  – число максимумов,

$pf$  – пикфактор для максимального значения процесса.

Значение  $S_m$  определяется по плотности вероятности максимумов по следующему выражению:[5]

$$S_m = \sum_{i=1}^K (x_i - m_x)^2 p_{mi}, \quad (40)$$

где  $p_{mi}$  – плотность вероятности максимумов.

Для вычисления  $S_{ms}$  необходимо нормировать  $p_{mi}$  по числу  $n_{ms}$ :

$$S_{ms} = \sum_{i=\frac{\sigma}{W}}^K (x_i - m_x)^2 p_{mi} \cdot \frac{n_m}{n_{ms}}, \quad (41)$$

|      |      |          |         |      |                                    |      |
|------|------|----------|---------|------|------------------------------------|------|
|      |      |          |         |      | КЭ-476.12.03.01.2018. 114-284. ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                                    | 31   |

где  $\sigma$  – СКО процесса.

Пикфактор вычисляется как отношение максимального значения процесса к СКО:

$$pf = \frac{x_{max}}{\sigma}. \quad (42)$$

Обработка измерительной информации включает следующие этапы:

1. Расчет среднего  $m_x$  и среднеквадратического  $\sigma_x$  значений по формулам:

$$m_x = \frac{\sum_{i=1}^{NP} x_i}{NP}, \quad (43)$$

$$\sigma_x = \frac{\sum_{i=1}^{NP} (x_i - m_x)^2}{NP}, \quad (44)$$

где  $NP$  – количество точек в процессе.

2. Определение минимума и максимума и соответствующего им времени.

3. Получение ширины класс-интервала:  $W = 0,2\sigma_x$ .

4. Выбор числа класс-интервалов:  $N = 20\sigma_x + 1 = 101$ .

5. Расчет плотности вероятности при  $m_x = 0$  в единицах СКО ( $\sigma_x$ ) для законов Гаусса:  $G(i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-0,5(0,2(i-N/2))^2}$ , и Релея:  $R(i) = \frac{i}{7^2} e^{-i^2/7^2}$ .

6. Получение гистограммы мгновенных значений:

1) обнуление массива в  $N=101$  значений;

2) определение № диапазона для каждого значения измерений как

$N_i = \frac{x_i}{W} + \frac{N}{2}$  и добавление к значению в  $N_i$  единицы;



3) нормирование значений в массиве, путем деления их на число точек в обрабатываемых данных и на  $\frac{W_x}{\sigma_x} = 0,2$ . Таким образом получаются значения плотности вероятности, нормированные в единицах СКО;

7. Получение гистограммы пиковых значений:

1) обнуление двух массивов в  $N=101$  значений каждый для максимумов и минимумов;

2) если текущее  $x_i$  больше предыдущего и последующего и больше  $m_x$ , то считать его максимумом, определение для него № класс-интервала как  $N_i = \frac{x_i}{W} + \frac{N}{2}$  и добавление к значению в  $N_i$  единицы;

3) если текущее  $x_i$  меньше предыдущего и последующего и меньше  $m_x$ , то считать его минимумом, определение для него № класс-интервала как  $N_i = \frac{x_i}{W} + \frac{N}{2}$  и добавление к значению в  $N_i$  единицы;

4) нормирование значений в массивах, путем деления их на число максимумов или минимумов соответственно и на  $\frac{W_x}{\sigma_x} = 0,2$ . Таким образом получатся значения плотности вероятности, рассчитанные в единицах СКО.

8. Получение функций распределений как интегралов от плотности вероятности.

9. Получение значений эксцесса и асимметрии по плотности вероятности мгновенных значений.

10. Вычисление значения СКО максимумов как второго центрального момента от плотности вероятности максимумов.

11. Вычисление СКО максимумов, лежащих выше СКО процесса.

12. Сохранение результатов в файлах на диске.

Вызов и загрузка программы «Histo» записываются в секциях запускаемого в системе «Ritm» RtR файла. Поведение модуля обработки программируется при составлении задания на обработку с помощью командной строки. В командной строке указывается имя модуля и далее набор ключей:

|      |      |          |         |      |                                     |      |
|------|------|----------|---------|------|-------------------------------------|------|
|      |      |          |         |      | КЭ-4 76.12.03.01.2018. 114-284. ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                                     | 33   |

Histo **/tn** число **/tk** число **/n** номер **/b** номер1 номер2

Входные данные для обработки представляют собой измерительную информацию в буферах на диске, а также определяются с помощью командной строки, состоящей из следующих параметров:

**/tn** число – начальное время обработки,

**/tk** число – конечное время обработки,

**/n** номер – номер параметра, начиная с которого сохраняются результаты,

**/a** номер – обработка одного параметра,

**/b** номер1 номер2 – обработка группы параметров.

Запускающие ключи: **/a**, **/b**.

Поддерживаются ключи:

**/npr** – отключение вывода сообщений в протоколе,

**/no\_message** – отключение вывода сообщений в редакторе ресурсов.

Результатом работы программы «Histo» является получение значений СКО, коэффициентов асимметрии и эксцесса, графиков плотностей вероятности и функций распределения мгновенных и пиковых значений параметров, определение плотностей вероятности и функций распределения случайного сигнала, подчиненного нормальному распределению и распределению Релея. Полученные законы распределения сохраняются в буферах на диске с номерами, начиная с буфера, указанного в командной строке после ключа **/n**. Для обозначения графиков к названию параметра справа добавляется сокращенное обозначение соответствующей характеристики: «\_мгн», «\_мах», «\_мин» – для плотностей вероятности мгновенных значений, максимумов и минимумов; «\_мгн\_P», «\_мах\_P», «\_мин\_P» – для функции распределения мгновенных значений, максимумов и минимумов. В паспорт параметра с плотностью вероятности в переменную «Param» секции [head] записываются значения математического ожидания, среднеквадратического отклонения, асимметрии, эксцесса, времени обработки, значения экстремумов и соответствующее им время.

|      |      |          |         |      |                                     |      |
|------|------|----------|---------|------|-------------------------------------|------|
|      |      |          |         |      | КЭ-4 76.12.03.01.2018. 114-284. ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                                     | 34   |

### 2.2.3 Описание модуля «SKO\_TABLEM»

Программа «Sko\_tablem» является модулем системы регистрации и обработки измерительной информации «Ritm» и работает с данными, подготовленными в системе «Ritm». Программа написана на языке Delphi.

Программа «Sko\_tablem» предназначена для обработки сигналов, полученных при нагружении объекта испытания случайной вибрацией и осуществляет расчет СКО сигнала по СПМ в заданных частотных диапазонах с рассчитанными погрешностями вычисляет эффективную частоту и меру широкополосности сигнала.[5]

Алгоритм процедуры расчета СКО представлен в блок схеме на рисунке 2.2.3.1:



Рисунок 2.2.3.1 – Блок схема программы «Sko\_tablem»

Среднеквадратическое отклонение в диапазоне частот  $f_1 - f_2$  определяется в соответствии с выражением

$$\sigma(f_1 - f_2) = \sqrt{\Delta f \sum_{k_1}^{k_2} G_{xx}(f_k)}, \quad k_1 = \frac{f_1}{\Delta f} - 1, k_2 = \frac{f_2}{\Delta f} - 1, \text{ где } G_{xx}(f_k) - \text{СПМ.} \quad (45)$$

Эффективная частота в диапазоне частот  $f_1 - f_2$  определена в соответствии с выражением

$$F(f_1 - f_2) = \Delta f \sqrt{\frac{\sum_{k_1}^{k_2} k^2 G_{xx}(f_k)}{\sum_{k_1}^{k_2} G_{xx}(f_k)}}, \quad f_1 = k_1 \Delta f, f_2 = k_2 \Delta f \quad (46)$$

Оценка показывает среднее число пересечений процессом математического ожидания за 1 сек, деленное на 2.

Мера широкополосности в диапазоне частот  $f_1 - f_2$  определена в соответствии с выражением

$$B(f_1 - f_2) = \frac{\sqrt{\left(\sum_{k_1}^{k_2} G_{xx}(f_k)\right) \left(\sum_{k_1}^{k_2} k^4 G_{xx}(f_k)\right)}}{\sum_{k_1}^{k_2} k^2 G_{xx}(f_k)}, \quad f_1 = k_1 \Delta f, f_2 = k_2 \Delta f \quad (47)$$

Погрешность определения среднеквадратического отклонения в диапазоне частот  $f_1 - f_2$  вызванного шумом стендовой системы измерения определяется в соответствии с выражением

$$\varepsilon(\sigma) = \sigma_c * \sqrt{m_p^2 + \left(\frac{1}{df * kv}\right)^2} + 1.22 * \frac{\sigma_{ш}}{\sigma_c} \quad (48)$$

где  $\sigma_c$  – значение СКО сигнала;

$\sigma_{ш}$  – значение СКО шума системы нагружения;

$m_p$  – мультипликативная погрешность первичных преобразователей;

$df=f_2-f_1$  – частотный диапазон;

$kv$  – количество выборок.

Программа состоит из следующих составных частей:

- загрузка данных в буферы на диске;
- определение границ частотного диапазона;
- определение СКО;
- расчет эффективной частоты;
- расчет меры широкополосности;
- запись на диск текстового файла с таблицей.

Вызов и загрузка программы «Sko\_tablem» записываются в секциях запускаемого в системе «Ritm» RtR файла. Поведение модуля обработки программируется при составлении задания на обработку с помощью командной строки. В командной строке указывается имя модуля и далее набор ключей

*Sko\_tablem имя файла1.txt имя файла2.txt /new /df1 число1 число2 /df2 число3 число4 /b номер1 номер2.*

Входные данные для обработки должны быть предварительно обработаны программой «Sprm»:

***имя файла1.txt*** – название файла для сохранения СКО;

***имя файла2.txt*** – название файла с рассчитанным СКО шума;

***/new*** – создать новый файл для записи СКО;

***/df1*** – *число1* *число2* – первый частотный диапазон расчета СКО;

***/df2*** – *число3* *число4* – второй частотный диапазон расчета СКО;

*/a номер* – обрабатываем один параметр;

*/b номер1 номер 2* – обрабатываем группу параметров.

Запускающие ключи */a, /b*.

Поддерживаются ключи */npr, /mem*.

Пример задания с обработкой начального участка для оценки уровня шума, с получением СПМ и таблиц СКО с погрешностями:

*rdr ISP.rmф2 /tn 1 /tk 10 /b 1 5*

*spectr /np 2048 /b 1 5*

*spm /b 1 5*

*Sko\_shum shum.txt /new /df1 2 40 /df2 2 100 /b 1 5*

*rdr ISP.rmф2 /tn 3000 /tk 3600 /b 1 5*

*spectr /np 2048 /b 1 5*

*spm /b 1 5*

*sko\_tablem sko.txt shum.txt /new /df1 2 40 /df2 2 100 /b 1 5*

Результатом работы программы «Sko\_tablem» является таблица которая содержит следующие данные:

- 1 Номер параметра;
- 2 Название параметра;
- 3 СКО сигнала в масштабе;
- 4 Погрешность;
- 5 Эффективная частота;
- 6 Мера широкополосности;

Погрешность не указывается, если уровень СКО сигнала составляет менее 0.2 В.

## 2.2.4 Описание программы «SPM»

Программа «SPM» является модулем системы регистрации и обработки измерительной информации «Ritm» и работает с данными, подготовленными в системе «Ritm». Программа написана на языке Delphi.

Программа «SPM» предназначена для обработки сигналов, полученных при нагружении объекта испытания широкополосной случайной вибрацией, и осуществляет расчет спектральной плотности мощности сигнала выборками с получением спектра плотности мощности.

Алгоритм программы приведен в блок схеме на рисунке 2.2.4.1.



Рисунок 2.2.4.1 – Блок схема программы «Spm»

Характеристика определяется как среднее по  $n_d$  реализациям длиной  $T$  и имеет размерность  $(e d^2 / Гц)$ .

$$G_{xx}(f) = \frac{2}{n_d T} \sum_{i=0}^{n_d} |X_i(f, T)|^2, \quad (49)$$

где  $X(f, T)$  – дискретное преобразование Фурье для процесса  $x_i(t)$

$n_d$  – количество реализаций по которым производится усреднение;

$T$  – длина реализации.

Программа состоит из следующих составных частей

- считывание реальных и мнимых составляющих во временные файлы;
- расчет СПМ;
- определение дисперсии для полученной СПМ;
- получение нормированной СПМ делением на дисперсию – по заданию;
- запись временных файлов на диск.

Вызов и загрузка «Spm» записываются в секциях запускаемого в системе «Ritm» RtR файла.

*Spm /norm /b номер 1 номер 2*

Входные данные должны находиться в буферах на диске и содержать в себе: реальные составляющие в первой половине файла и мнимые во второй половине;

**/norm** – получение нормированной СПМ (по умолчанию ненормированная);

**/a номер** – обрабатываем один параметр;

**/b номер 1 номер 2** – обрабатываем группу параметров.

Запускающие ключи **/a, /b**.

Поддерживаются ключи **/npr, /mem**.

Выходные данные по результатам работы программы «SPM» представляют собой графики спектральной плотности мощности, записанные в буферах на диске.



## 2.2.5 Описание программы «PIC\_TABLEM»

Программа «Pik\_tablem» является модулем системы регистрации и обработки измерительной информации «Ritm» и работает с данными, подготовленными в системе «Ritm». Программа написана на языке Delphi.

Программа «Pik\_tablem» предназначена для обработки сигналов, полученных при нагружении объекта испытания случайной вибрацией и осуществляет расчет математического ожидания, СКО по временной реализации (во всем диапазоне измерения), вычисляет пик-фактор (отношение максимума к СКО) и определяет время этого максимума.

Алгоритм процедуры расчета пик факторов представлен в блок схеме на рисунке 2.2.5.1.



Рисунок 2.2.5.1 – Блок схема программы «Pik-tablem»

Таблица пик-факторов содержит следующие характеристики процесса:

- МО – среднее значение на интервале обработки в единицах ускорения,  $m_x$ :

$$m_x = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (50)$$

где -  $x_i$  - дискретные значения параметра в выбранном интервале,

- $i=1...N$  - номера дискретных значений параметра в выбранном интервале;
- СКО – среднеквадратическое значение в единицах ускорения, вычисленное за вычетом среднего значения,  $\sigma_x$ :

$$\sigma_x = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(x_i - m_x)^2}{N-1}}; \quad (51)$$

где  $x_i$  - дискретные значения параметра в выбранном интервале;

$m_x$  – математическое ожидание;

$i=1...N$  - номера дискретных значений параметра в выбранном интервале;

- пик-фактор, определяется как отношение максимума к СКО:

$$\text{Пик-фактор} = \frac{x_{\max} - m_x}{\sigma_x}; \quad (52)$$

- $x_{\max}$  – значение максимума;

Программа состоит из следующих составных частей:

- загрузка данных в буферы на диске;
- расчет математического ожидания;
- расчет СКО за вычетом МО;
- определение максимального значения параметра;
- расчет пик-факторов;

- создание на диске текстового файла с таблицей.

Вызов и загрузка программы «Pik\_tablem» записываются в секциях запускаемого в системе «Ritm» RtR файла. Поведение модуля обработки программируется при составлении задания на обработку с помощью командной строки. В командной строке указывается имя модуля и далее набор ключей

*Pik\_tablem имя файла.txt /new /head /b номер 1 номер 2*

Входные данные для обработки должны загружаться из исходного файла зарегистрированных параметров в формате rmf2 и содержать фрагменты временной реализации.

*имя файла.txt* – название файла для сохранения пик-факторов;

*/new* – создать новый файл для записи пик-факторов;

*/head* – записывать заголовок в таблице пик-факторов;

*/a номер* – обрабатываем один параметр;

*/b номер1 номер 2* – обрабатываем группу параметров;

Запускающие ключи */a, /b*.

Поддерживаются ключи */npr, /mem*.

Результатом работы программы «Pik\_tablem» является таблица которая содержит следующие данные:

- 1 номер параметра;
- 2 название параметра;
- 3 среднее значение в мВ;
- 4 СКО сигнала в В;
- 5 СКО сигнала в масштабе;
- 6 Размерность после масштабирования;
- 7 Пик-фактор;
- 8 Максимальное значение;
- 9 Время максимума;
- 10 Чувствительность датчика.

## 2.3 Методика обработки измерительной информации

### 2.3.1 Общие положения

Зарегистрированные в процессе испытаний сигналы представляют собой нестационарные случайные процессы, включающие себя наборы кусочно-стационарных реализаций из которых выбираются участки со стационарным движением.

Конкретная реализация процесса, описывающего случайное явление, называется выборочной функцией (или реализацией, если речь идет о наблюдении конечной длительности). Совокупность всех возможных выборочных функций, которые может дать случайное явление, называется случайным процессом.

Стационарными называются случайные процессы, протекающие во времени приблизительно однородно и имеющие вид непрерывных случайных колебаний вокруг некоторого среднего значения, причем ни средняя амплитуда, ни характер этих колебаний не обнаруживают существенных изменений с течением времени. К нестационарным случайным процессам относятся все случайные процессы, не удовлетворяющие условиям стационарности.

Анализ результатов измерений включает статистическую обработку вибрационных процессов на стационарных режимах движения транспортных средств и определение параметров квазистатических перегрузок на стационарных и нестационарных участках движения.

На первом этапе обработки информации выбираются интервалы стационарного движения, объединённые в группы по скоростям с шагом 5 км/ч. Все остальные интервалы обрабатываются как нестационарные.

Обработка выполняется как по отдельным интервалам, так и с объединением интервалов.

Для каждой группы скоростей по всем параметрам получают[1]:

|             |             |                 |                |             |  |             |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|--|-------------|
|             |             |                 |                |             | <i>КЭ-4 76.12.03.01.2018. 114-284. ВКР</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |  | 44          |

- 1) усреднённые огибающие спектральной плотности мощности (СПМ) по всем интервалам в группе для всех случаев транспортировки составных частей макета;
- 2) нормированные огибающие СПМ;
- 3) среднеквадратические отклонения по усредненным СПМ в частотных диапазонах 0,5-20 Гц и 0,5-40 Гц, 0,5-40 Гц и 0,5-100 Гц.
- 4) графики плотностей вероятности и функции распределения.
- 5) таблицы пик-факторов по объединённым интервалам реализаций.

### 2.3.2 Выбор стационарных участков движения

Для стационарных участков принят интервал времени, равный 60 с. [2]

На первом этапе выбора интервалов стационарного движения критерием являлось «постоянство скорости» движения. Под «постоянной скоростью» понимается скорость, изменяющаяся в указанных допусках.

Интервалы выбирались методом текущего среднего, а именно:

- 1) в качестве первого интервала принимается отрезок записи, начиная с первой секунды длительностью 60 с;
- 2) определяются: среднее значение, максимальное и минимальные значения на этом интервале;
- 3) если разница между максимальным и минимальным значениями средним значением меньше 10%, интервал принимается для оценки стационарности, запоминается начальное время интервала;
- 4) выбирается следующий интервал, начальное время которого на 1 с больше предыдущего. Обработка повторяется с п. 2) до последнего интервала реализации.

На втором этапе выбора интервалов стационарного движения критерием являлось «постоянство среднеквадратических отклонений (СКО) ускорений» у основания балансирных опор:[1]

- 1) на каждом выбранном интервале рассчитываются СКО с временем усреднения 5 с;
- 2) определяются: среднее значение, максимальное и минимальные значения на этом интервале;
- 3) если разница между максимальным и минимальным значениями по отношению к среднему значению меньше 100%, интервал принимается для оценки стационарности, запоминается начальное время интервал;
- 4) все выбранные интервалы поделены на группы, соответствующие разным скоростям движения. Шаг деления на группы выбран равным 5 км/ч;
- 5) для каждой группы скоростей получилось разное количество интервалов, приведенное в таблице 1.
- 6) по выбранным интервалам стационарного движения выполнена обработка по всем измерительным параметрам для всех групп.

Результаты обработки – число выбранных стационарных интервалов для каждой группы скоростей – представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Число выбранных стационарных участков для каждой группы скоростей

| Средняя скорость интервала, км/ч | Число интервалов |
|----------------------------------|------------------|
| 5                                | 33               |
| 10                               | 22               |
| 15                               | 38               |
| 20                               | 44               |
| 25                               | 37               |
| 30                               | 40               |
| 35                               | 64               |
| 40                               | 90               |

Продолжение таблицы

|       |      |
|-------|------|
| 45    | 97   |
| 50    | 143  |
| 55    | 147  |
| 60    | 107  |
| 65    | 113  |
| 70    | 92   |
| 75    | 89   |
| 80    | 52   |
| 85    | 12   |
| Всего | 1220 |

2.3.3 Обработка стационарных участков

Для процессов ускорений, зарегистрированных на стационарных участках движения определяются следующие характеристики[2]:

1. Нормированная спектральная плотность

Нормированная спектральная плотность в диапазоне частот  $f1 - f2$ , получается отношением спектральной плотности к дисперсии спектра в диапазоне частот  $f1 - f2$ :

$$G_{xx}^n = \frac{G_{xx}}{\sigma^2}, \quad (54)$$

где  $G_{xx}$  - спектральная плотность;

$\sigma^2$  - дисперсия спектра.

Значение дисперсии спектра в диапазоне частот  $f1 - f2$ , определяется в со-

ответствии с выражением:

$$\sigma^2(f_1 - f_2) = \Delta f \sum_{k_1}^{k_2} G_{xx} \quad , \quad k_1 = \frac{f_1}{\Delta f} - 1, k_2 = \frac{f_2}{\Delta f} - 1, \quad (55)$$

где  $\Delta f$  - разрешающая способность по частоте,  $\Delta f = 1/T_g$

$T_g$  - длительность выборочной реализации.

2. Спектральная плотность определяется в виде:

$$G_{xx}(f_k) = \frac{2}{T_g} \sum_{k=1}^N (\text{Re}[X(f_k)]^2 + \text{Im}[X(f_k)]^2) \quad (56)$$

где  $\text{Re}[X(f_k)]$  и  $-\text{Im}[X(f_k)]$  - реальная и мнимая составляющие спектра Фурье  $k$ -той выборочной реализации,

$N$  - число реализаций.  $N$  определяется отношением длительности записи к длительности выборочной реализации  $N = T/T_g$

3. Число выборочных реализаций определяет статистическую ошибку:

$$\varepsilon = 1/\sqrt{N} * 100\% \quad (57)$$

4. Среднеквадратическое отклонение вычисляется как:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (58)$$

5. Эффективная частота в диапазоне частот  $f_1 - f_2$  определяется в соответствии с выражением:

|             |             |                 |                |             |   |             |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|---|-------------|
|             |             |                 |                |             | <i>КЭ-476.12.03.01.2018. 114-284. ВКР</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |   | 48          |



$$F(f_1 - f_2) = \Delta f \sqrt{\frac{\sum_{k_1}^{k_2} k^2 G_{xx}(f_k)}{\sum_{k_1}^{k_2} G_{xx}(f_k)}} \quad f_1 = k_1 \Delta f, f_2 = k_2 \Delta f. \quad (59)$$

6. Мера широкополосности в диапазоне частот  $f_1 - f_2$  определяется в соответствии с выражением:

7.

$$B(f_1 - f_2) = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{k_1}^{k_2} G_{xx}(f_k) \sum_{k_1}^{k_2} k^4 G_{xx}(f_k)}{k_1}}{\sum_{k_1}^{k_2} k^2 G_{xx}(f_k)}} \quad f_1 = k_1 \Delta f, f_2 = k_2 \Delta f. \quad (60)$$

7. Верхняя граница диапазона частот, в котором среднеквадратическое отклонение составляет 90 % -  $F_{90\%}$  от полученного в частотном диапазоне измерений;

8. Максимальное по абсолютной величине пиковое значение приводится в таблице пик-факторов.

- Математическое ожидание – среднее значение на интервале обработки в единицах ускорения,  $m_x$ .

$$m_x = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}. \quad (61)$$

где -  $x_i$  - дискретные значения параметра в выбранном интервале,

-  $i = 1 \dots N$  = номера дискретных значений параметра в выбранном интервале

|      |      |          |         |      |   |      |
|------|------|----------|---------|------|---|------|
|      |      |          |         |      | <i>КЭ-476.12.03.01.2018. 114-284. ВКР</i> | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |   | 49   |

ле;

- СКО – среднеквадратическое значение в единицах ускорения, вычисленное за вычетом среднего значения,  $\sigma_x$ :

$$\sigma_x = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(x_i - m_x)^2}{N-1}}; \quad (62)$$

- Пик фактор – отношение максимума к СКО;

$$\text{Пик-фактор} = \frac{x_{\max} - m_x}{\sigma_x}. \quad (63)$$

- Мах – значение максимума;
- t(c) - время наступления максимума.

и) Плотность вероятностей и моменты распределения (пик-фактор, коэффициент асимметрии, коэффициент эксцесса) мгновенных значений, а также плотность вероятностей пиковых значений и числовые характеристики аппроксимирующего её закона.

Графики гистограмм сопровождаются таблицами, в которых приведены моменты, описывающие основные свойства плотности вероятности.

Моментом s-го порядка называется сумма вида:

$$a_s(x) = \sum_{i=1}^K x_i^s p_i^* \quad (64)$$

Первый момент есть математическое ожидание  $m_x$

$$m_x = \sum_{i=1}^K x_i^* p_i^* \quad (65)$$

Центральным моментом s-го порядка называется сумма вида:

$$\mu_s = \sum_{i=1}^K (x_i - m_x)^s p_i^* \quad (66)$$

Второй центральный момент есть дисперсия случайной величины

$$\sigma^2_x = \sum_{i=1}^K (x_i - m_x)^2 p_i^* \quad (67)$$

Математическое ожидание  $m_x$  и дисперсия  $\sigma^2_x$  характеризуют наиболее важные черты распределения: его положение и степень разбросанности.

к) Передаточная характеристика линейной системы с одним процессом на входе  $x(t)$  и одним процессом на выходе  $y(t)$  вычисляется по формуле:

$$H(f) = \frac{G_{xy}(f)}{G_{xx}(f)} = |H(f)| e^{-j\varphi(f)}, \quad (68)$$

где  $|H(f)|$  и  $\varphi(f)$  - амплитудная и фазовая характеристики.

$$G_{xx}(f) = \frac{2}{M} \sum_{j=0}^M |X_j(f)|^2, G_{xy}(f) = \frac{2}{M} \sum_{j=0}^M |X_j(f)| |Y_j(f)|, \quad (69)$$

$$G_{yy}(f) = \frac{2}{M} \sum_{j=0}^M |Y_j(f)|^2, \quad (70)$$

где  $X(f_k) \cdot Y(f_k)$  есть комплексное преобразование Фурье,

$X^*(f_k)$  есть комплексное сопряжение преобразования Фурье.

Функция когерентности  $\gamma_{xy}^2(f_k)$  двух последовательностей  $x(t)$  и  $y(t)$  служит мерой точности оптимального линейного прогноза последовательности  $y(t)$  по значениям последовательности  $x(t)$  и определяется в виде

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_{xx}(f)G_{yy}(f)} \quad (71)$$

#### 2.3.4 Спектральные характеристики процессов ускорений

Спектральные плотности мощности (СПМ) вычислены с использованием взвешивающего окна Ханна с разрешением по частоте 0,3 Гц. (Частота дискретизации 600 Гц, размер выборки 2048 точек)

Для исключения появления дополнительных шумов, при «слиянии» разных интервалов в один, получение СПМ выполнялось по каждому интервалу отдельно и затем полученные СПМ усреднялись. По каждому параметру получены огибающие по СПМ для разных скоростей.

Результаты построения СПМ процессов ускорений при различных скоростях движения агрегата в процессе транспортировки приведены в Приложении А, огибающие СПМ приведены в Приложении Б.

#### 2.3.5 Зависимость СКО процессов ускорений от скорости движения

Для оценки нагруженности изделия при транспортировке по результатам измерений для различных скоростей стационарного движения получены графики

зависимости СКО процессов ускорений в частотном диапазоне 0.3 – 100 Гц от скорости движения. Результаты приведены в Приложении В.

Максимальные значения СКО процессов ускорений, зарегистрированные при транспортировке приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Максимальные значения СКО процессов ускорений

| Параметр | S, м/с <sup>2</sup> , в диапазоне частот. Гц |          |          |           |
|----------|--|----------|----------|-----------|
|          | 0.3 – 20                                     | 0.3 - 40 | 0.3 - 60 | 0.3 - 100 |
| UX5      | 0.09   | 0.11     | 0.22     | 0.41      |
| UY4      | 0.24   | 0.30     | 0.51     | 0.69      |
| UY5      | 0.21   | 0.33     | 0.40     | 0.61      |
| UZ4      | 0.10   | 0.12     | 0.19     | 0.39      |
| UZ5      | 4.17   | 4.69     | 4.81     | 4.94      |
| UX5      | 0.13   | 0.21     | 0.22     | 0.31      |
| UX4      | 0.13   | 0.14     | 0.15     | 0.23      |
| UY4      | 0.29   | 0.45     | 0.47     | 0.86      |
| UY5      | 0.29   | 0.78     | 0.83     | 1.10      |
| UY6      | 0.29   | 0.43     | 0.49     | 0.73      |
| UZ4      | 0.20   | 0.26     | 0.35     | 0.91      |
| UZ5      | 0.27   | 0.27     | 0.44     | 0.68      |
| UZ6      | 0.28   | 0.33     | 0.34     | 0.35      |

### 2.3.6 Передаточные функции для процессов ускорений

По результатам испытаний, для сочетаний выходных и входных переменных параметров, получены совместные статистические характеристики.

### 2.3.7 Анализ нагрузок при нестационарных режимах движения

Для нестационарных участков движения выбраны интервалы записи, оставшиеся от отобранных стационарных участков движения с ненулевой скоростью.

Значения максимальных и минимальных значений для процессов ускорений с заданными доверительными вероятностями приведены в Приложении Д.

В Приложении Г приведены ненормированные гистограммы распределения мгновенных и максимальных значений ускорений за всё время транспортировки (для участков записи, где скорость секции отличалась от нулевой).

В Приложении Е приведены графики функций распределения мгновенных значений ускорений на нестационарных участках движения агрегата. Ограничения значений параметров с уровнем достоверности 0.95 приведены в комментариях к графику функции распределения.

В данной главе была рассмотрена методика обработки результатов измерений, а также технические средства используемые при регистрации измерительной информации. Методика включает в себя статистическую обработку вибрационных процессов во время движения транспортных средств и определение квазистатических перегрузок на стационарных и нестационарных участках движения. Была произведена первичная обработка измерительной информации при помощи подключаемых модулей Histo, Sko\_tablem, SPM, Pik\_tablem в программном пакете Ritm.

|             |             |                 |                |             |   |             |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|---|-------------|
|             |             |                 |                |             | <i>КЭ-476.12.03.01.2018. 114-284. ВКР</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |   | 54          |

### 3 РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ «Мах\_Sko»

В АО «ГРЦ Макеева» была поставлена задача написать модуль (задание) в Ritm (используя макроязык и модули обработки), которая будет находить в полученных в процессе обработки таблицах (таблицы по параметрам UX4-36СКО.txt, UX5-35СКО.txt и т.д.) зависимости СКО от скорости вида представленном на рисунке 3.1:

Таблица  
15Т520 УсредненныеЗначения 14.02.2015 05:40:46  
Обработка проведена:  
КИХ-фильтр:ФНЧ 100.0 Гц Кг=100дб/дек По 262144 точкам ; СФ с окном Ханна по 34 выборкам в 3.413с (2048 точек), tn=225767.0, tk=225826.7 с ;

| Назв.           | СКО         | ШСВ  | Эф.частота | Мера        | СКО  | ШСВ   | Эф.частота       | Мера  |
|-----------------|-------------|------|------------|-------------|------|-------|------------------|-------|
| парам.          | 0.29-19.9Гц | Гц   | ш-пол      | 0.29-39.8Гц | Гц   | ш-пол | Гц               | ш-пол |
| 901 UX4-36_5    | 0.03        | 9.86 | 1.49       | 0.03 м/с2   | 17.2 | 1.76  | UX4-36_5КМ       |       |
| 902 UX4-36_1    | 0.04        | 7.56 | 1.87       | 0.04 м/с2   | 18.5 | 1.82  | UX4-36_10КМ      |       |
| 903 UX4-36_1    | 0.05        | 7.37 | 1.93       | 0.06 м/с2   | 19.7 | 1.72  | UX4-36_15КМ      |       |
| 904 UX4-36_2    | 0.05        | 7.80 | 1.88       | 0.06 м/с2   | 21.2 | 1.61  | UX4-36_20КМ      |       |
| 905 UX4-36_2    | 0.06        | 7.46 | 1.93       | 0.08 м/с2   | 21.4 | 1.60  | UX4-36_25КМ      |       |
| 906 UX4-36_3    | 0.06        | 6.54 | 2.19       | 0.08 м/с2   | 20.0 | 1.72  | UX4-36_30КМ      |       |
| 907 UX4-36_3    | 0.08        | 6.39 | 2.22       | 0.09 м/с2   | 19.2 | 1.80  | UX4-36_35КМ      |       |
| 908 UX4-36_4    | 0.08        | 6.13 | 2.25       | 0.09 м/с2   | 20.2 | 1.72  | UX4-36_40КМ      |       |
| 909 UX4-36_4    | 0.08        | 6.31 | 2.11       | 0.09 м/с2   | 18.9 | 1.81  | UX4-36_45КМ      |       |
| 910 UX4-36_5    | 0.08        | 6.55 | 2.09       | 0.10 м/с2   | 19.1 | 1.80  | UX4-36_50КМ      |       |
| 911 UX4-36_5    | 0.09        | 6.23 | 2.23       | 0.10 м/с2   | 15.2 | 2.18  | UX4-36_55КМ      |       |
| 912 UX4-36_6    | 0.10        | 5.60 | 2.48       | 0.12 м/с2   | 16.7 | 2.03  | UX4-36_60КМ      |       |
| 913 UX4-36_6    | 0.11        | 5.07 | 2.61       | 0.12 м/с2   | 15.5 | 2.21  | UX4-36_65КМ      |       |
| 914 UX4-36_7    | 0.11        | 4.82 | 2.65       | 0.12 м/с2   | 12.4 | 2.62  | UX4-36_70КМ      |       |
| 915 UX4-36_7    | 0.12        | 4.89 | 2.49       | 0.13 м/с2   | 12.6 | 2.58  | UX4-36_75КМ      |       |
| 916 UX4-36_8    | 0.12        | 5.09 | 2.39       | 0.13 м/с2   | 14.0 | 2.39  | UX4-36_80КМ      |       |
| 917 UX4-36_8    | 0.13        | 4.93 | 2.50       | 0.14 м/с2   | 12.9 | 2.62  | UX4-36_85КМ      |       |
| 918 UX4-36_Огиб | 0.15        | 5.37 | 2.27       | 0.16 м/с2   | 14.0 | 2.38  | UX4-36_Огибающая |       |

Таблица  
15Т520 УсредненныеЗначения 14.02.2015 05:40:46  
Обработка проведена:  
КИХ-фильтр:ФНЧ 100.0 Гц Кг=100дб/дек По 262144 точкам ; СФ с окном Ханна по 34 выборкам в 3.413с (2048 точек), tn=225767.0, tk=225826.7 с ;

| Назв.           | СКО         | ШСВ  | Эф.частота | Мера        | СКО  | ШСВ   | Эф.частота       | Мера  |
|-----------------|-------------|------|------------|-------------|------|-------|------------------|-------|
| парам.          | 0.29-60.1Гц | Гц   | ш-пол      | 0.29-99.9Гц | Гц   | ш-пол | Гц               | ш-пол |
| 901 UX4-36_5    | 0.03        | 20.2 | 1.82       | 0.04 м/с2   | 53.3 | 1.63  | UX4-36_5КМ       |       |
| 902 UX4-36_1    | 0.04        | 23.9 | 1.73       | 0.06 м/с2   | 57.4 | 1.43  | UX4-36_10КМ      |       |
| 903 UX4-36_1    | 0.07        | 26.0 | 1.62       | 0.10 м/с2   | 60.7 | 1.34  | UX4-36_15КМ      |       |
| 904 UX4-36_2    | 0.07        | 27.8 | 1.52       | 0.10 м/с2   | 61.2 | 1.33  | UX4-36_20КМ      |       |
| 905 UX4-36_2    | 0.09        | 30.1 | 1.48       | 0.14 м/с2   | 62.6 | 1.27  | UX4-36_25КМ      |       |
| 906 UX4-36_3    | 0.09        | 28.8 | 1.56       | 0.14 м/с2   | 62.9 | 1.27  | UX4-36_30КМ      |       |
| 907 UX4-36_3    | 0.10        | 28.9 | 1.59       | 0.17 м/с2   | 62.9 | 1.26  | UX4-36_35КМ      |       |
| 908 UX4-36_4    | 0.11        | 29.0 | 1.55       | 0.17 м/с2   | 63.4 | 1.27  | UX4-36_40КМ      |       |
| 909 UX4-36_4    | 0.10        | 28.2 | 1.60       | 0.17 м/с2   | 65.1 | 1.26  | UX4-36_45КМ      |       |
| 910 UX4-36_5    | 0.11        | 28.5 | 1.61       | 0.18 м/с2   | 63.8 | 1.27  | UX4-36_50КМ      |       |
| 911 UX4-36_5    | 0.11        | 26.2 | 1.78       | 0.18 м/с2   | 63.7 | 1.29  | UX4-36_55КМ      |       |
| 912 UX4-36_6    | 0.13        | 26.4 | 1.76       | 0.21 м/с2   | 62.3 | 1.30  | UX4-36_60КМ      |       |
| 913 UX4-36_6    | 0.13        | 25.8 | 1.85       | 0.19 м/с2   | 60.8 | 1.34  | UX4-36_65КМ      |       |
| 914 UX4-36_7    | 0.13        | 24.5 | 1.94       | 0.20 м/с2   | 62.7 | 1.31  | UX4-36_70КМ      |       |
| 915 UX4-36_7    | 0.14        | 22.6 | 2.09       | 0.21 м/с2   | 62.2 | 1.35  | UX4-36_75КМ      |       |
| 916 UX4-36_8    | 0.14        | 25.0 | 1.99       | 0.22 м/с2   | 62.7 | 1.30  | UX4-36_80КМ      |       |
| 917 UX4-36_8    | 0.15        | 19.2 | 2.38       | 0.23 м/с2   | 61.0 | 1.35  | UX4-36_85КМ      |       |
| 918 UX4-36_Огиб | 0.17        | 23.8 | 1.99       | 0.26 м/с2   | 59.6 | 1.35  | UX4-36_Огибающая |       |

Рисунок 3.1 – Входные данные для модуля «Мах\_Sko»

Максимальные значения параметра в каждом частотном диапазоне и сводить их в таблицу формата txt. Ранее эта операция проводилась оператором вруч-

ную, но в данном случае велика вероятность человеческой ошибки. Программа позволит минимизировать влияние человеческого фактора в данном вопросе.

Программа «Max\_Sko» является модулем системы регистрации и обработки измерительной информации «Ritm» и работает с данными, подготовленными в системе «Ritm». Программа написана на языке Delphi.

Программа «Max\_Sko» предназначена для обработки полученной информации в других модулях систем «Ritm». Данная программа позволяет загрузить таблицы с данными и по каждому из параметров найти максимальное значение.

Алгоритм процедуры расчета пик факторов представлен в блок-схеме на рисунке 3.2.

|             |             |                 |                |             |   |             |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|---|-------------|
|             |             |                 |                |             | <i>КЭ-476.12.03.01.2018. 114-284. ВКР</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |   | 56          |





Рисунок 3.2 – Блок схема программы «Max\_Sko»

Программа состоит из следующих составных частей

- Создание нового тестового документа;
- Формирование шапки таблицы;
- Загрузка текстовых документов;
- Нахождение максимума в каждом столбце;
- запись временных файлов на диск.

Вызов и загрузка программы «Max\_Sko» записываются в секциях запускаемого в системе «Ritm» RtR файла. Поведение модуля обработки программируется при составлении задания на обработку с помощью командной строки. В командной строке указывается имя модуля и далее набор ключей

Max\_Sko *имя*

Входные данные для обработки должны быть предварительно обработаны программой «Sko\_tablem»[9][10]:

*имя файла1.txt* – название исходного файла с значениями СКО;

*/YCol номер* – номер столбца;

*/StartStr номер* – начальная строка для обработки.

*/FinishStr номер* – последняя строка для обработки.

*/Y* – параметр

*/T номер* – обработка параметра с заданного номера

Пример задания с нахождением максимального значения СКО в каждом столбце:

```
RdXY ->F+'СКО.TXT' /Y /T0 5 /dX 5 /YCol 3 /StartStr 8 /FinishStr 25 /name ->f  
/n ->num
```

```
setpasp /a ->num
```

```
Stat /a ->num
```

```
float floatSKOmax[1]:=Passp(/sect Extrems /ident Ymax /a ->num /type float)
```

Результатом работы программы «Max\_SK0» является таблица которая содержит следующие данные:

- Название параметра;
- Максимальные значения СКО в заданном диапазоне частот

Пример результата работы программы представлен на рисунке 3.3:

Таблица - Максимальные значения СКО процессов ускорений

| Параметр | Значения СКО, м/с <sup>2</sup> , в диапазоне частот |           |           |            |
|----------|---|-----------|-----------|------------|
|          | 0,3-20 Гц   | 0,3-40 Гц | 0,3-60 Гц | 0,3-100 Гц |
| UX4-36   | 0,15  | 0,16      | 0,17      | 0,26       |
| UX5-35   | 0,10  | 0,15      | 0,27      | 0,47       |
| UX5-36   | 1,69  | 1,71      | 1,71      | 1,75       |
| UY4-35   | 0,30  | 0,42      | 0,67      | 0,86       |
| UY4-36   | 0,47  | 0,69      | 0,71      | 1,14       |
| UY5-35   | 0,38  | 0,55      | 0,66      | 0,97       |
| UY5-36   | 0,48  | 1,04      | 1,14      | 1,57       |
| UY6-36   | 0,45  | 0,59      | 0,66      | 0,96       |
| UZ4-35   | 0,18  | 0,21      | 0,30      | 0,51       |
| UZ4-36   | 0,45  | 0,49      | 0,61      | 1,41       |
| UZ5-35   | 4,72  | 5,45      | 5,57      | 5,74       |
| UZ5-36   | 0,44  | 0,44      | 0,69      | 1,03       |
| UZ6-36   | 0,47  | 0,54      | 0,54      | 0,57       |

Рисунок 3.3 – Результат работы модуля «Max\_Sko»

Модуль «Max\_Sko» позволяет автоматизировать процесс получения статистических таблиц по итогам обработки результатов измерений. Программа минимизирует влияние человеческого фактора (ошибок оператора) на процесс статистического анализа результатов измерений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описаны основные принципы проведения испытаний на при транспортировании, приведен обзор используемых технических средств, описаны принципы сбора измерительной информации, программы обработки и методика анализа вибрационных нагрузок. Описана реализация программной части и приведены результаты работы разработанной программы.

В ходе выполнения ВКР была решена задача, поставленная АО «ГРЦ Макеева» разработать программу, которая будет находить максимальные значения в таблицах. Модуль «Мах\_Sko» позволяет автоматизировать процесс получения статистических таблиц по итогам обработки результатов измерений. Программа минимизирует влияние человеческого фактора (ошибок оператора) на процесс статистического анализа результатов измерений. Модуль «Мах\_Sko» можно преобразовать для нахождения максимальных и минимальных параметров по любым таблицам.

|             |             |                 |                |             |   |             |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|---|-------------|
|             |             |                 |                |             | <i>КЭ-476.12.03.01.2018. 114-284. ВКР</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |   | <i>60</i>   |

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методика анализа результатов измерений при транспортировке макета 1п040.031.М51.645: методические указания /сост. С.Ф.Молчанов, С.А.Нехорошков, В.И.Лямкин. – Миасс: Изд. АО «ГРЦ Макеева», 2015. – 30 с.
2. Измерение параметров транспортных нагрузок. Программа измерений 1п040.043.П71.732: методические указания /сост. И.Г. Галимов, С.В. Мотовилов, И.Е. Сааль, В.И. Лямкин, А.В. Егоров. – Миасс: Изд. АО «ГРЦ Макеева», 2015. – 51 с.
3. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). Т. 1. Колебания линейных систем/ под ред. В.В. Болотина. М.: Машиностроение, 1978.- 352 с.
4. Методика выполнения регистрации и обработки измерительной информации при воздействии на объект широкополосной случайной вибрацией №67 – 020 – 2013/48.5.006.153: методические указания /сост. С.Ю. Козлов. – Миасс: Изд. АО «ГРЦ Макеева», 2013. – 53 с.
5. Методика получения статистических характеристик при воздействии на объект широкополосной случайной вибрацией №67 – 020 – 2016/48.5.006.153: методические указания /сост. С.Ю. Козлов. – Миасс: Изд. АО «ГРЦ Макеева», 2016. – 36 с.
6. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). Т. 4. Вибрационные процессы и машины/ под ред. Э.Э. Лавендела. М.: Машиностроение, 1981.- 509 с.
7. Обработка измерительной информации, полученной при транспортировании 15Т535 (контейнера) и 15Т536(ИТК (ДУ БСР)): методические указания /сост. Н.А.Серажидинова, А.Е.Муравлёв, И.М. Чернов, А.О. Солохина. – Миасс: Изд. АО «ГРЦ Макеева», 2015. – 10 с.
8. Венцель, Е.С. Теория вероятностей: учебник для вузов/ Е.С Венцель. – М.: Изд-во Высш. шк., 1999.— 576 с.

|      |      |          |         |      |                                    |      |
|------|------|----------|---------|------|------------------------------------|------|
|      |      |          |         |      | КЭ-476.12.03.01.2018. 114-284. ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                                    | 61   |

9. Бендат, Дж. Прикладной анализ случайных данных / Дж. Бендат, А. Пирсол; перевод с англ. В.Е. Привальского, А.И. Кочубинского / под. ред. И.Н. Коваленко. – М.: Мир, 1989 г. – 540 с.
10. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). Т. 5. Измерения и испытания / под ред. М.Д. Генкина. М.: Машиностроение, 1981.- 456 с.
11. Фленов М.Е. Библия Delphi: учебное пособие/ М.Е Фленов – СПб.: БХВ Петербург, 2004. – 880 с.
- 12.Архангельский А.Я. Программирование в Delphi 5: учебное пособие / А.Я. Архангельский – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ЗАО «Издательство БИНОМ», 2000. – 1072 с.
13. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). Т. 6. Измерения и испытания / под ред. К.В. Фролов. М.: Машиностроение, 1978.- 352 с.
14. ГОСТ 19.402-78. Единая система программной документации. Описание программы. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 4 с.
15. Методика контроля технического состояния объекта при вибрационных испытаниях МВИ 067-17-02: методические указания/ сост. С.Ю. Козлов. – Миасс: Изд. АО «ГРЦ Макеева», 2013. – 34 с.
16. Официальный сайт ОАО «ГРЦ Макеева». – <http://makeyev.ru>
- 17.Блейхут, Р.Г. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов: справочник/ Р.Г. Блейхут. — М.: Изд-во «Мир», 1989. — 448 с.
- 18.Гольденберг, Л. М. Цифровая обработка сигналов: справочник/ Л.М. Гольденберг. — М.: Изд-во «Радио и связь», 1985. — 312 с.
- 19.Даджион, Д. Цифровая обработка многомерных сигналов/ Д. Даджион, Р. Мерсеро, — М.: Изд-во «Мир», 1988. — 488 с.

|             |             |                 |                |             |   |             |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|---|-------------|
|             |             |                 |                |             | <i>КЭ-476.12.03.01.2018. 114-284. ВКР</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |   | 62          |

20. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). Т. 2. Колебания нелинейных механических систем/ под ред. Ф.М. Диментберг. М.: Машиностроение, 1979.- 351 с.

|             |             |                 |                |             |   |             |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|---|-------------|
|             |             |                 |                |             | <i>КЭ-476.12.03.01.2018. 114-284. ВКР</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |   | <i>63</i>   |

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Графики СПМ процессов ускорений при транспортировке секции с завода-изготовителя на СИП

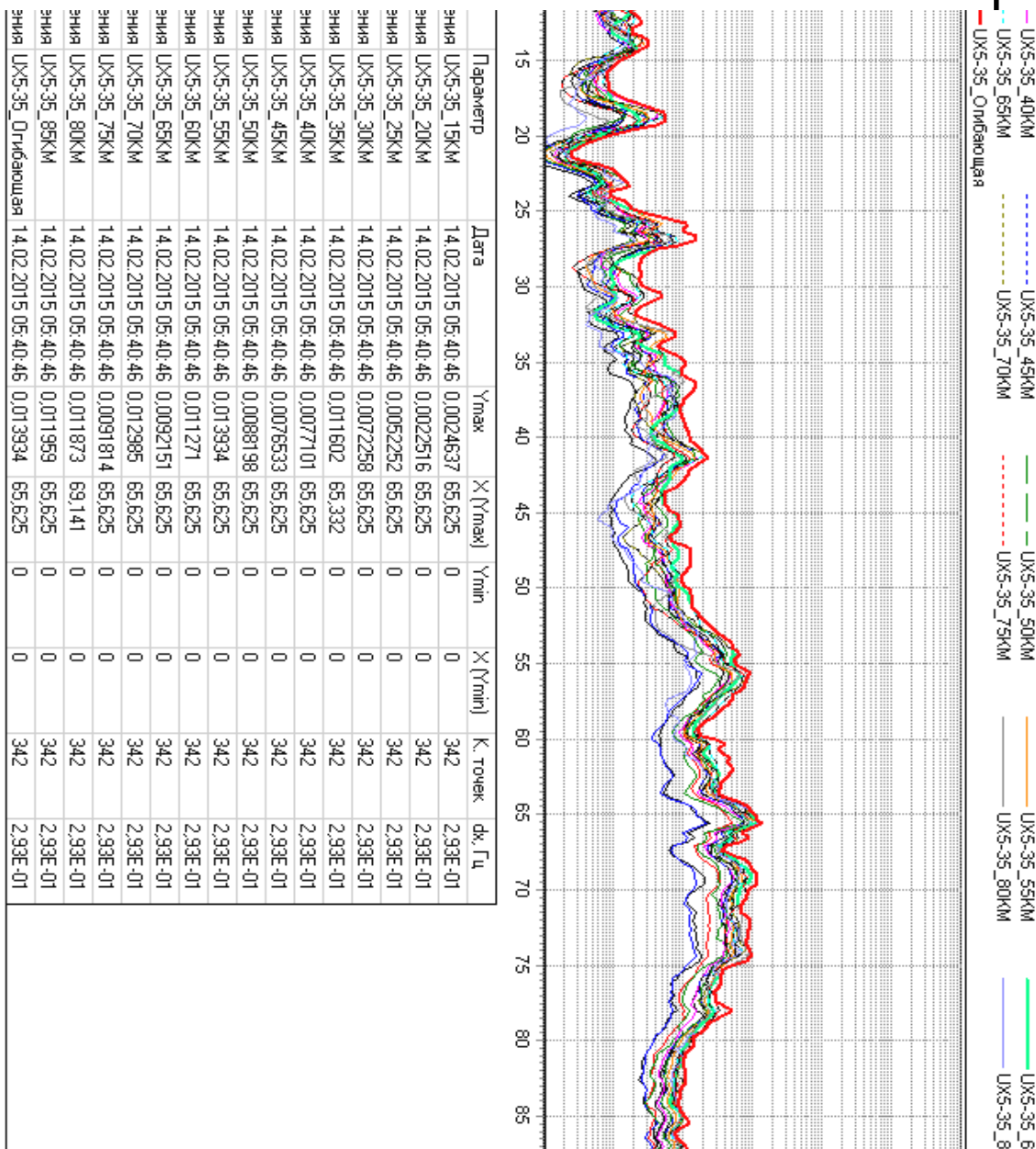


Рисунок А.1 – СПМ процессов ускорений для параметра UX5 (агрегат 15Т535)



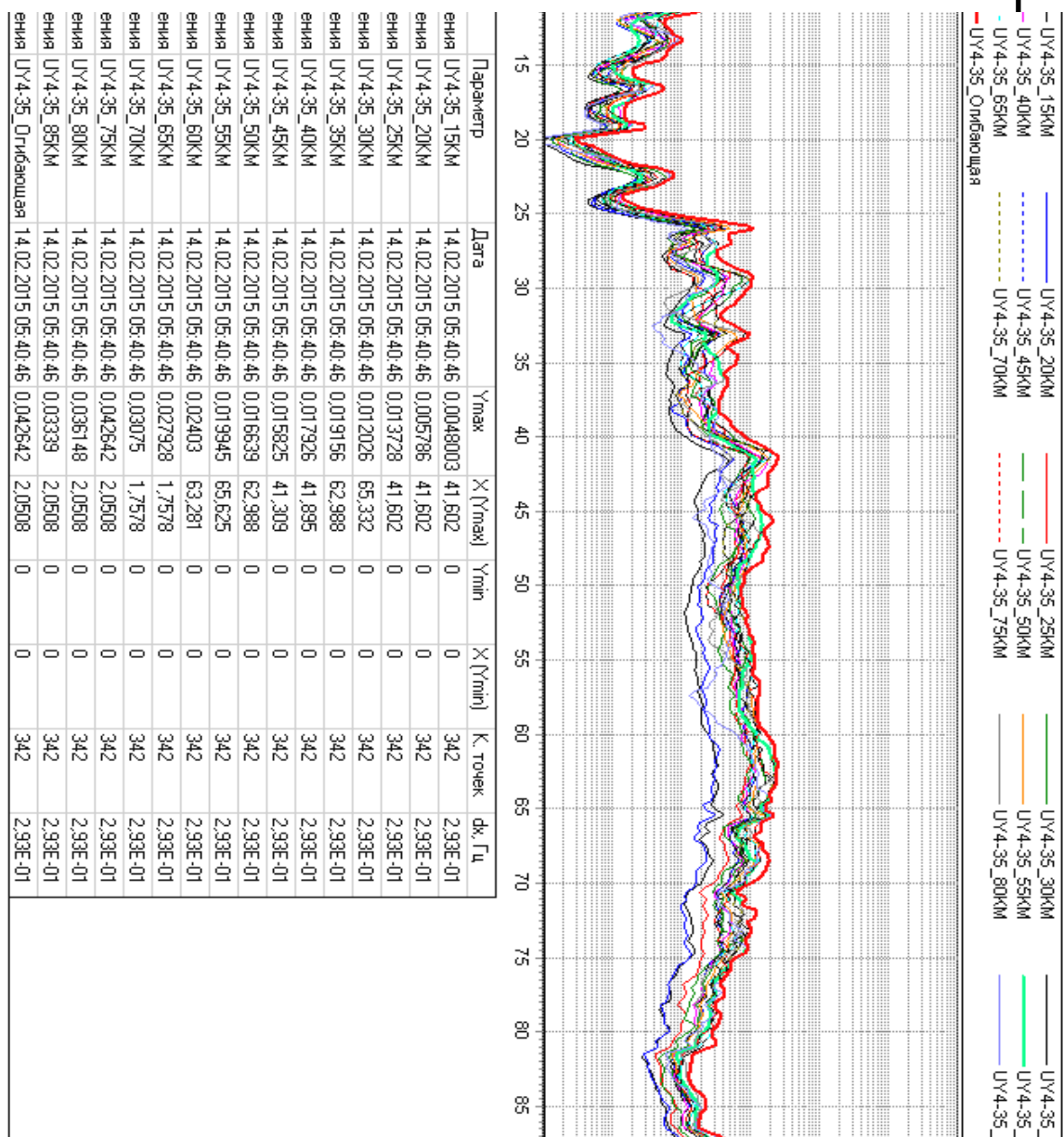


Рисунок А.2 – СПМ процессов ускорений для параметра UY4 (агрегат 15Т535)

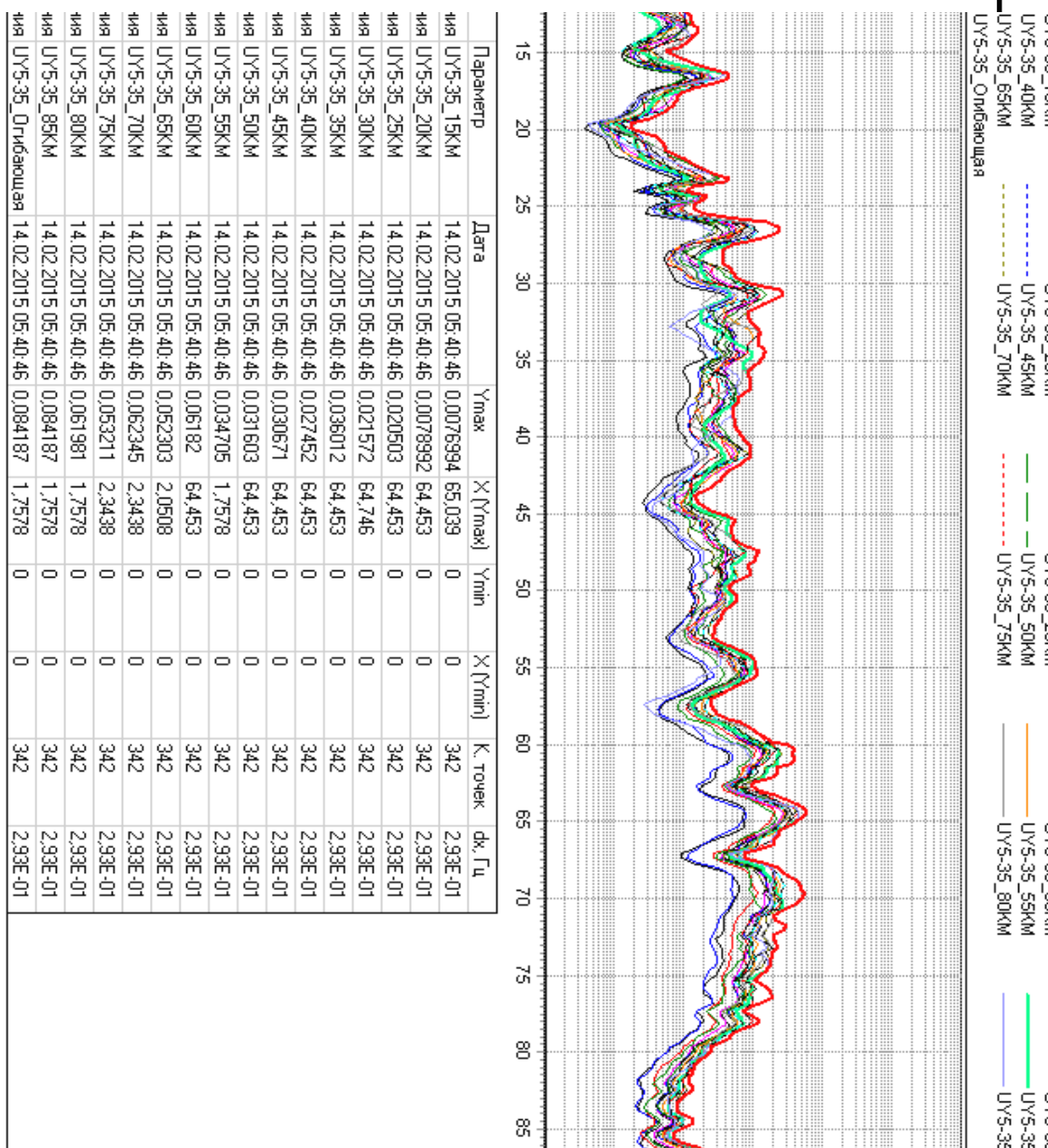


Рисунок А.3 – СПМ процессов ускорений для параметра UY5 (агрегат 15T535)

|      |      |          |         |      |
|------|------|----------|---------|------|
|      |      |          |         |      |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |

КЭ-476.12.03.01.2018. 114-284. ВКР

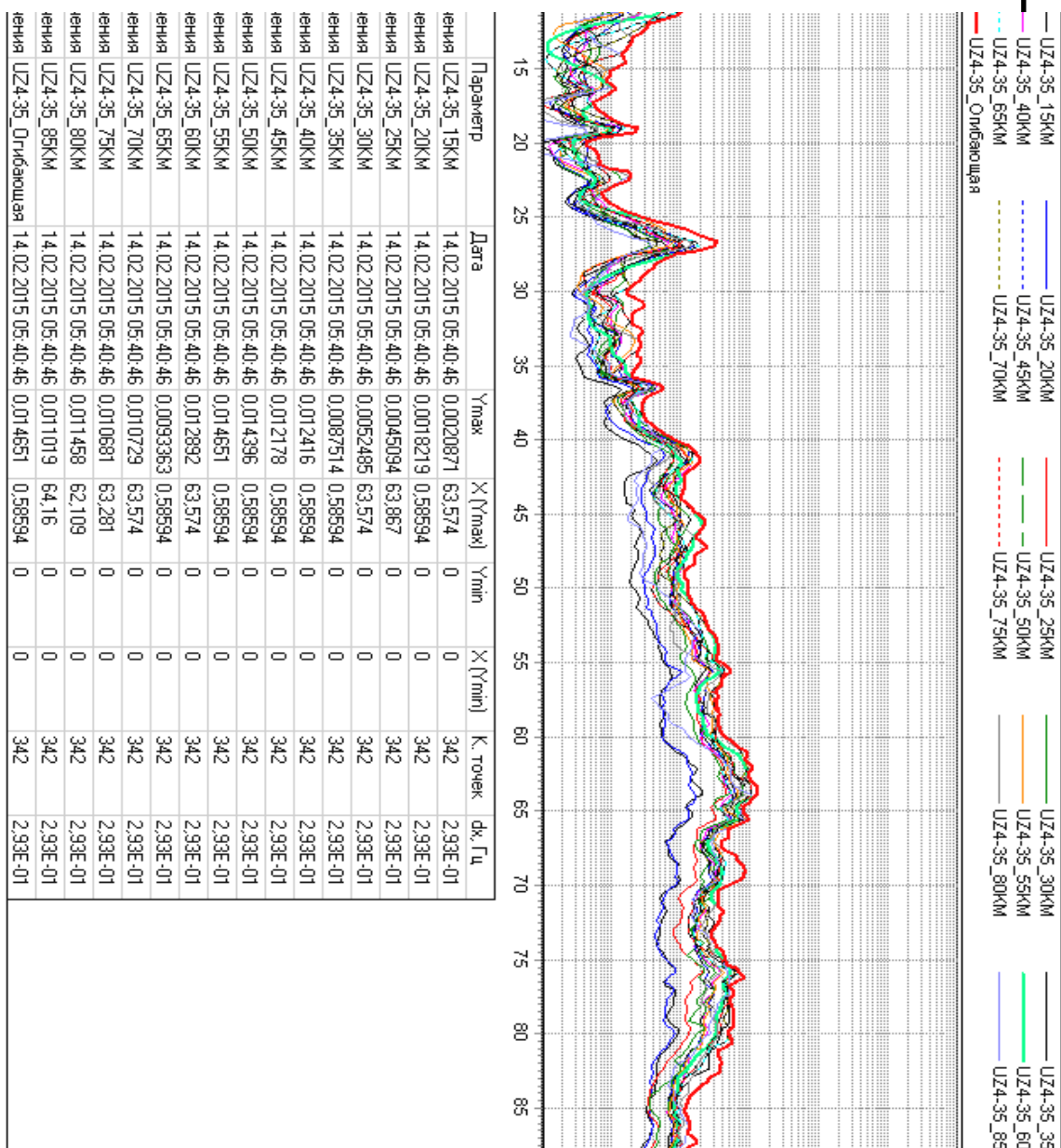


Рисунок А.4 – СПМ процессов ускорений для параметра UZ4 (агрегат 15T535)

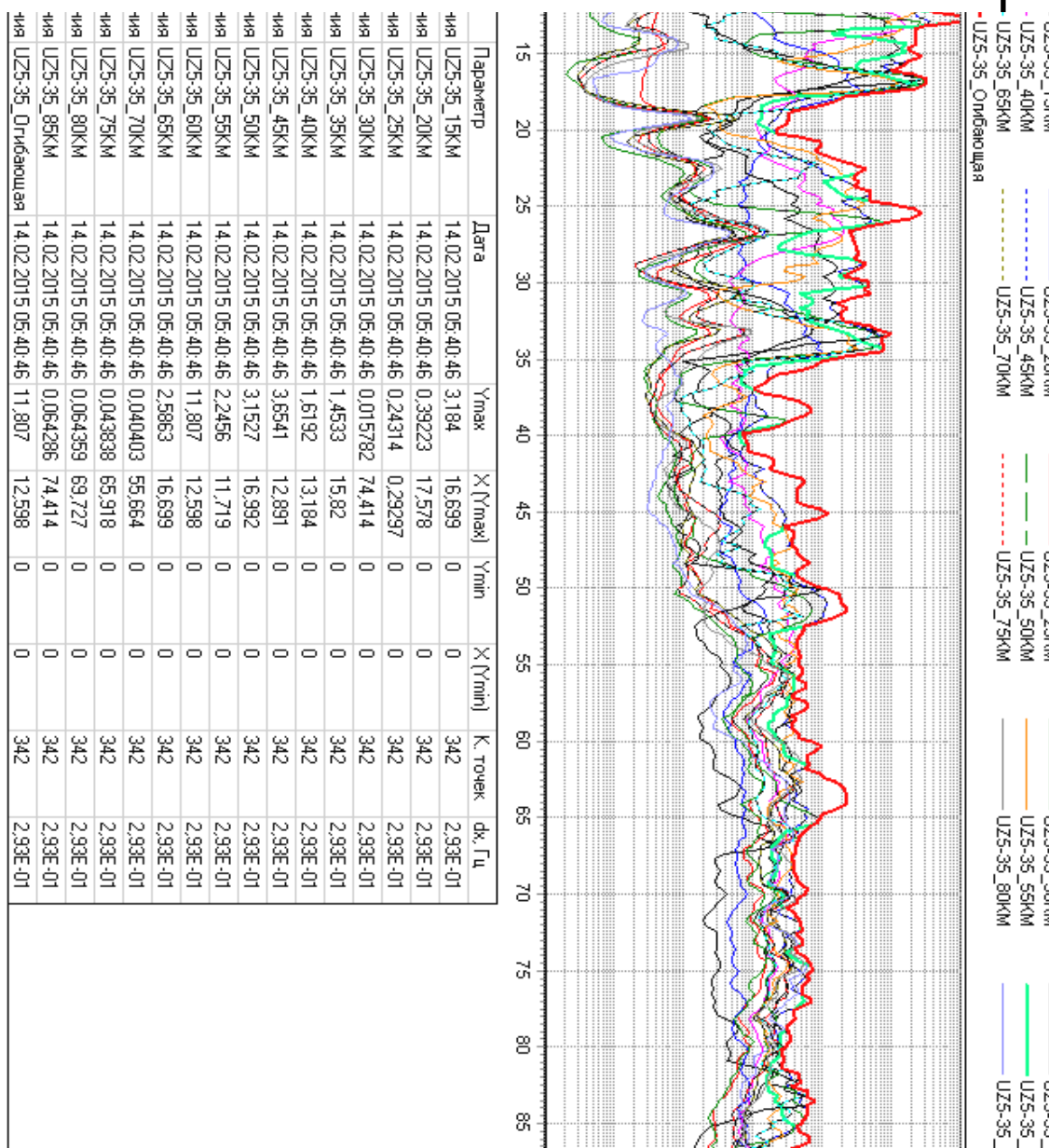


Рисунок А.5 – СПМ процессов ускорений для параметра UZ5 (агрегат 15Т535)

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Графики нормированных огибающих СПМ

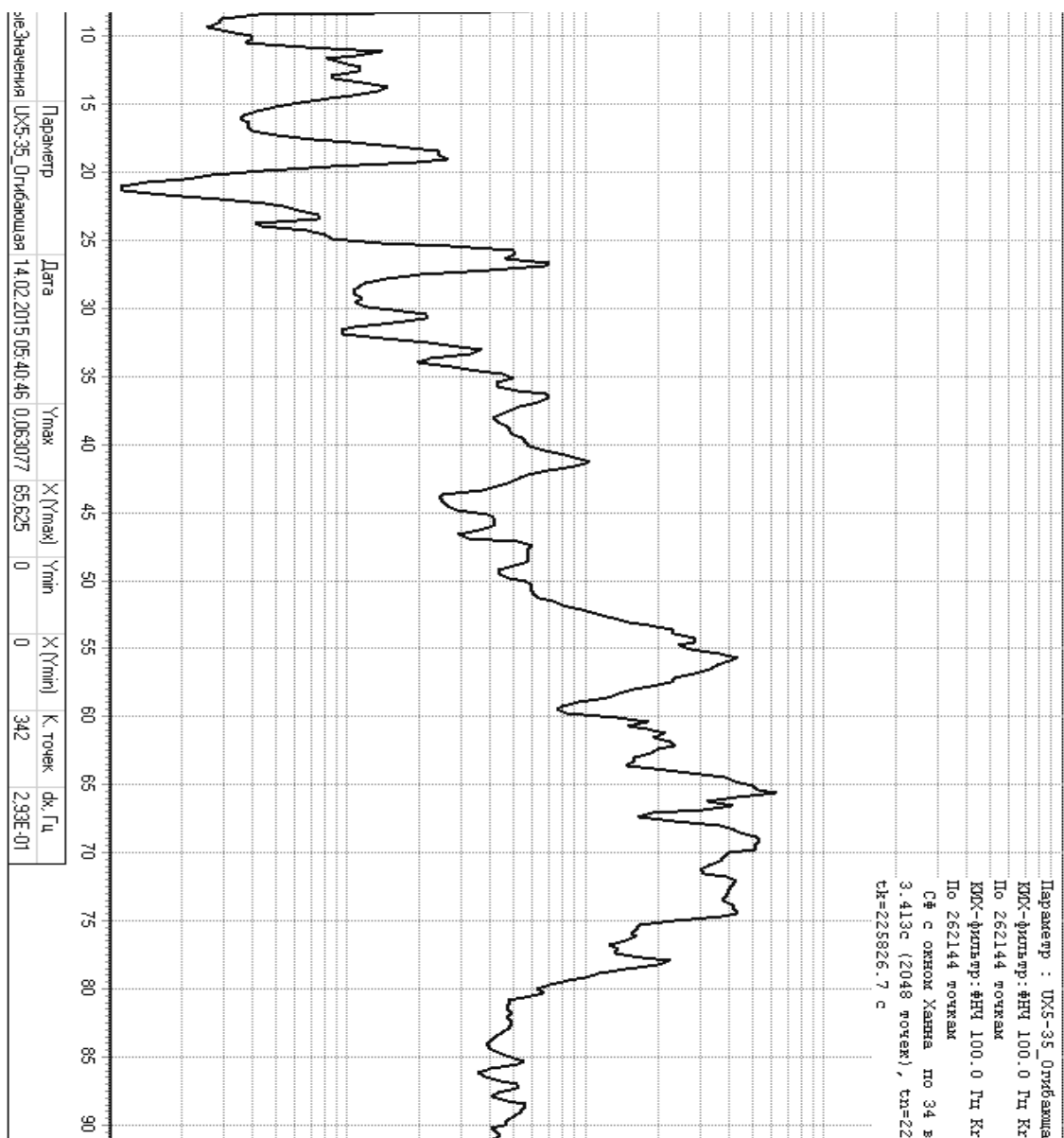


Рисунок Б.1 – Нормированная огибающая СПМ для параметра UX5 (агрегат 15T535)

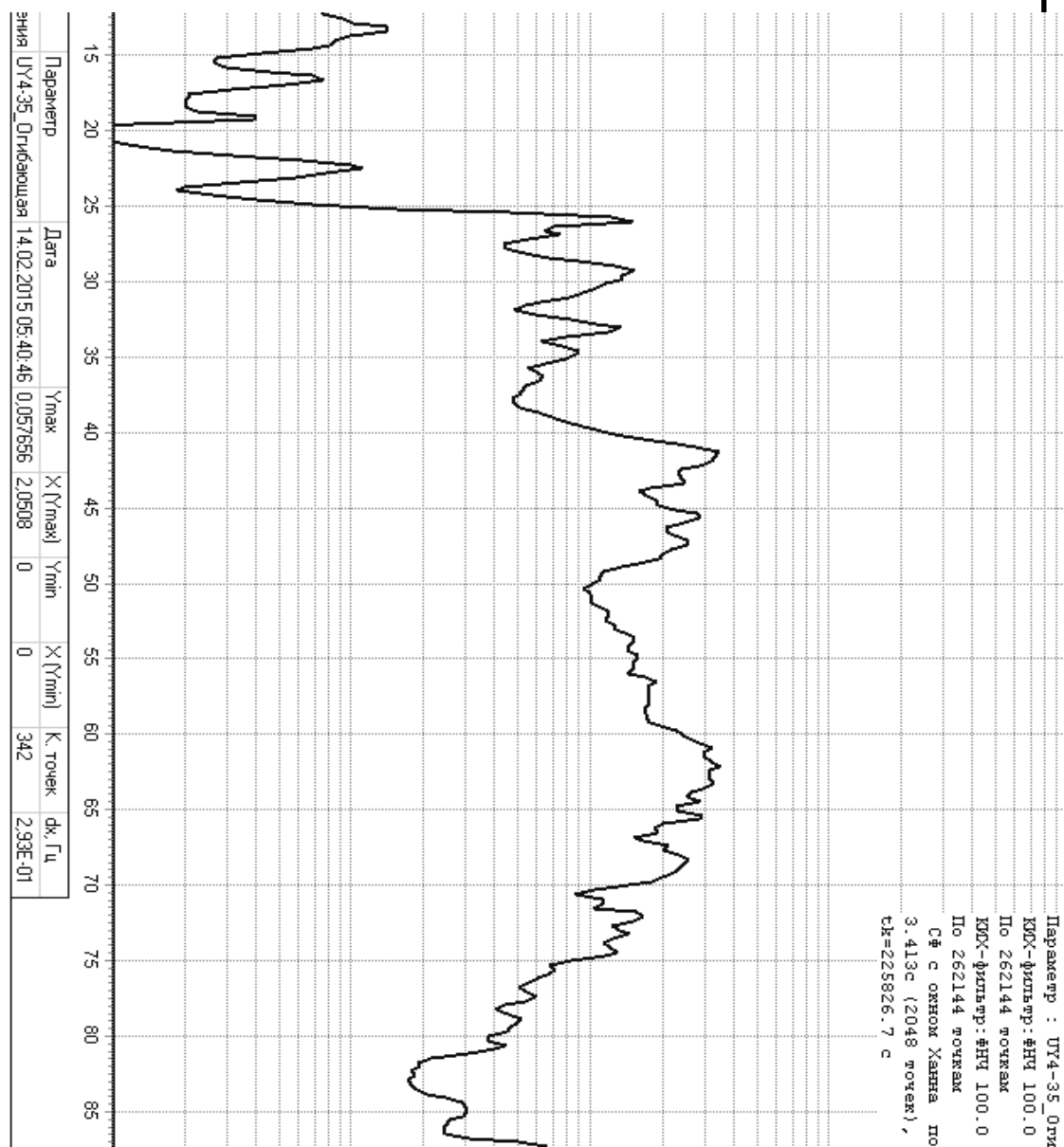


Рисунок Б.2– Нормированная огибающая СПМ для параметра UY4 (агрегат 15T535)

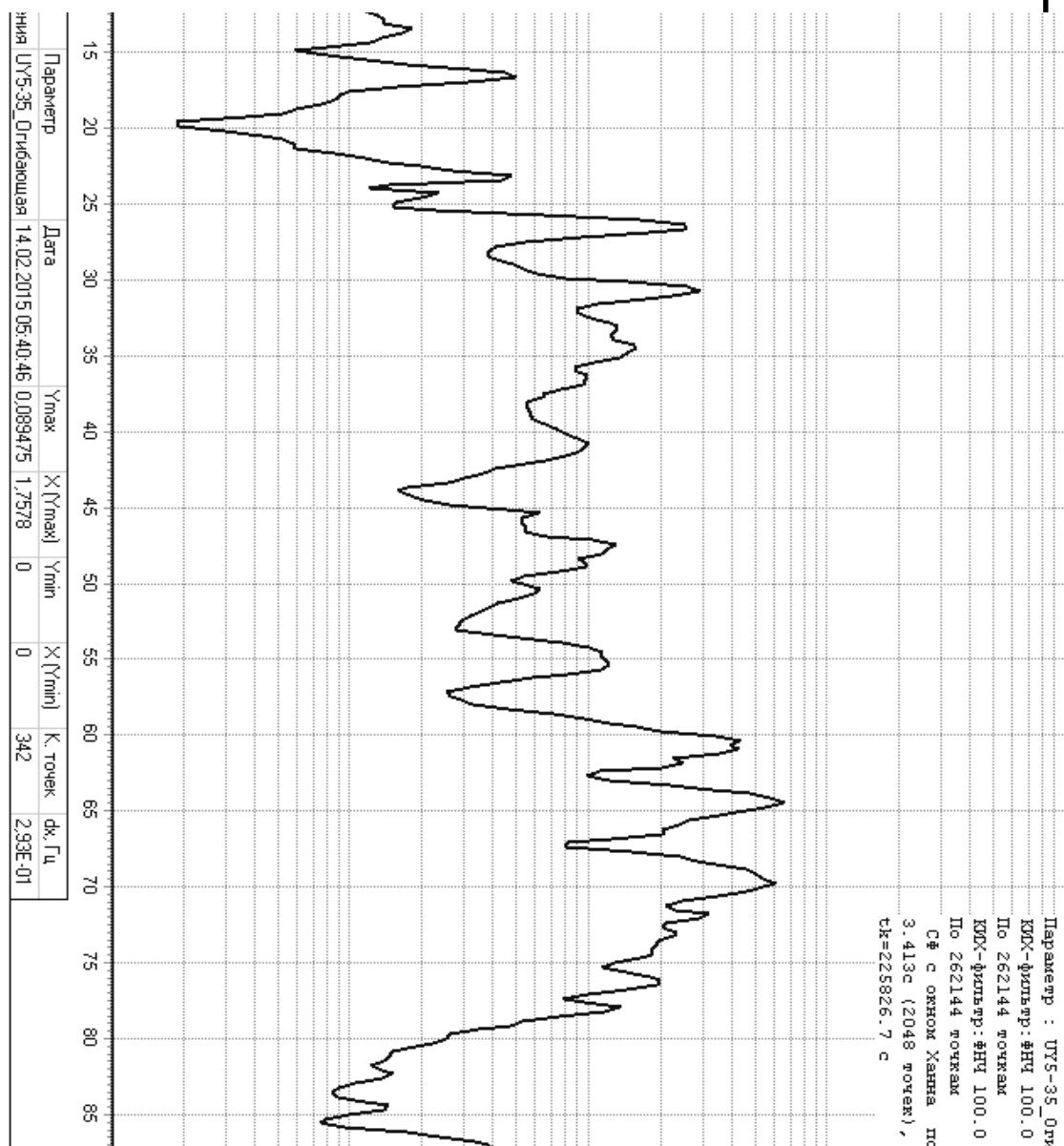


Рисунок Б.3 – Нормированная огибающая СПМ для параметра UY5 (агрегат 15T535)

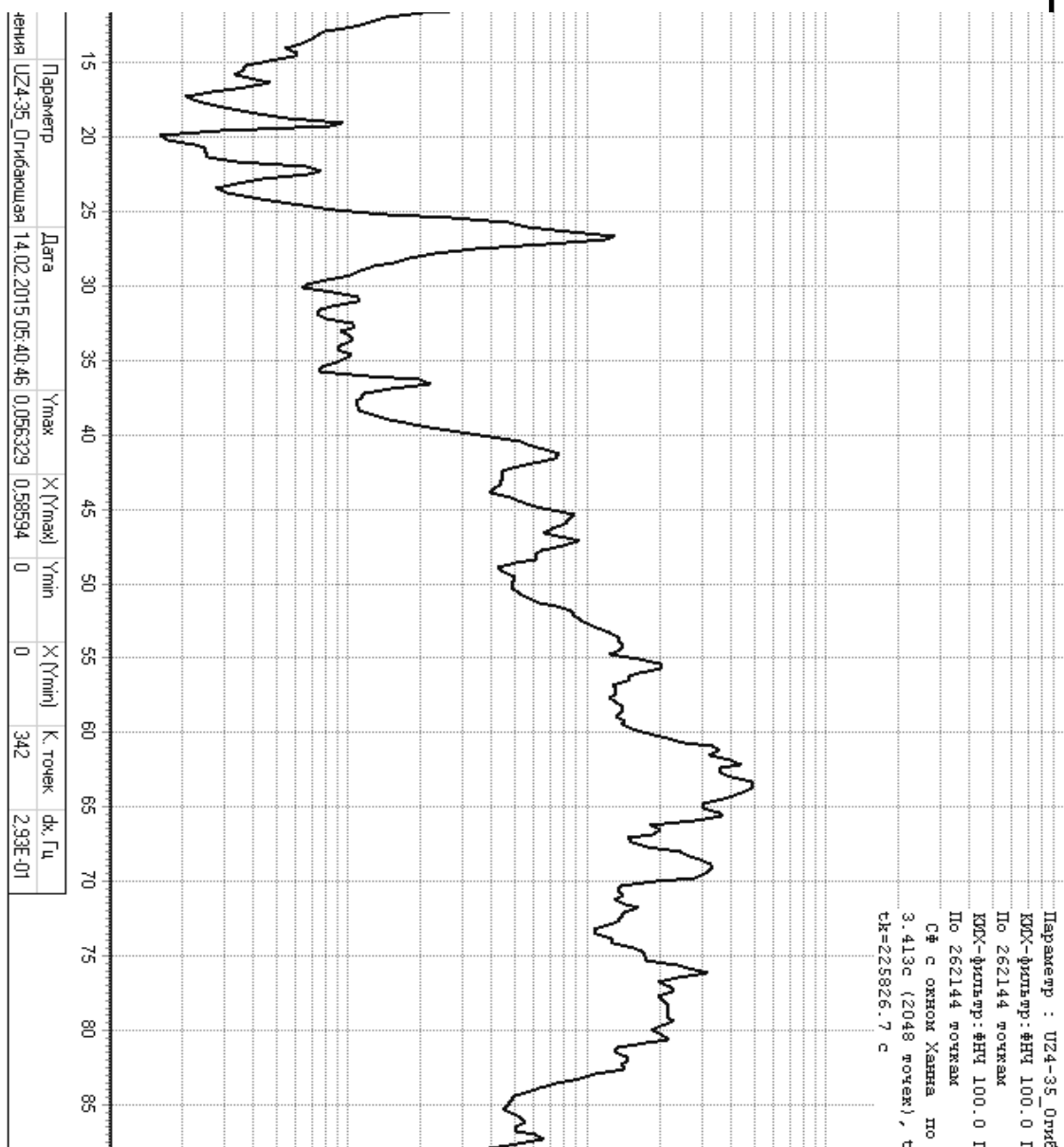


Рисунок Б.4 – Нормированная огибающая СПМ для параметра UZ4 (агрегат 15Т535)



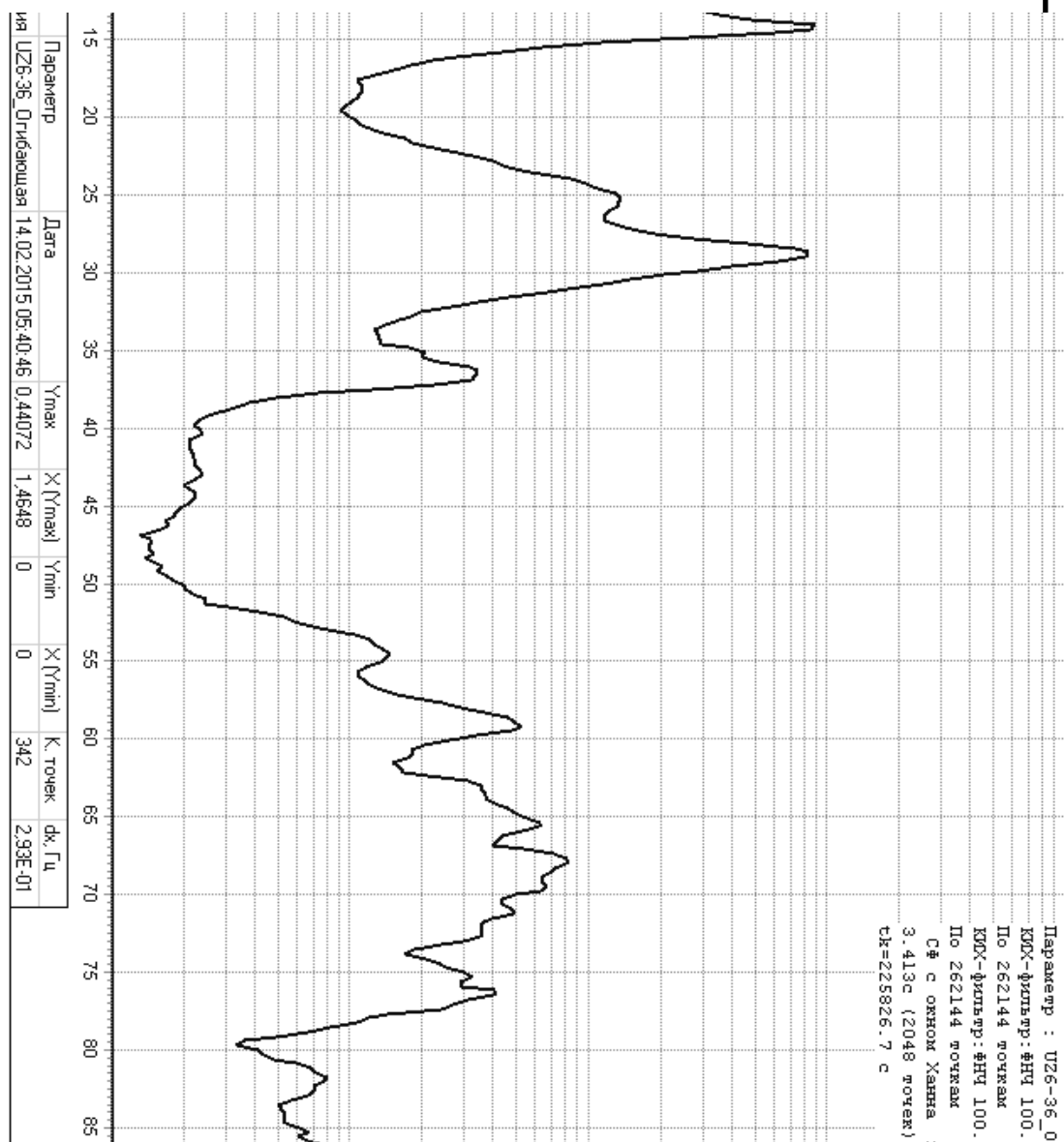


Рисунок Б.5 – Нормированная огибающая СПМ для параметра UZ5 (агрегат 15Т535)

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Зависимости СКО процессов ускорений  
от скорости движения агрегатов

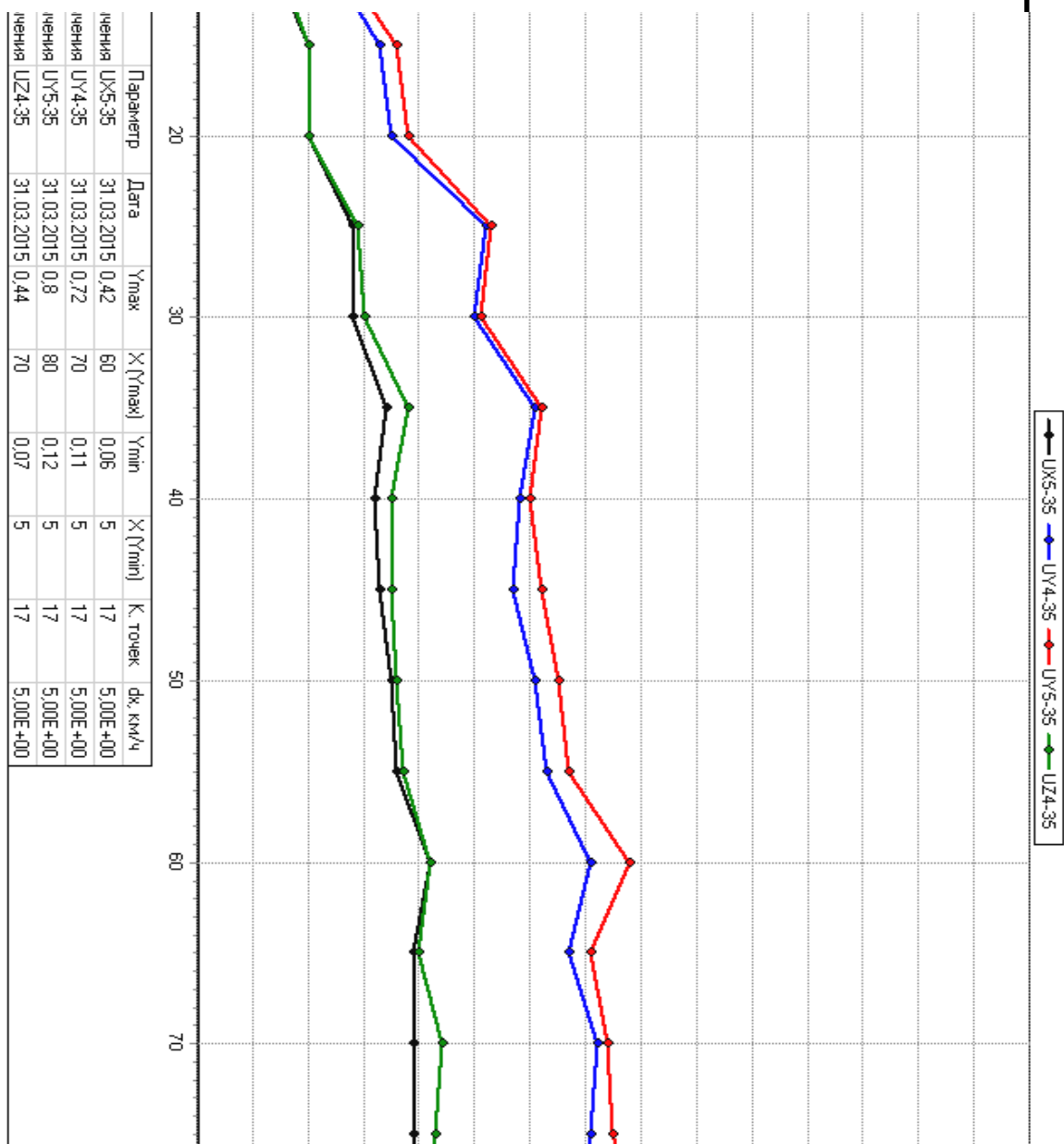


Рисунок В.1 – Зависимость СКО процессов ускорений для параметров U4, U5  
(агрегат 15Т535)

### ПРИЛОЖЕНИЕ Г

СКО процессов ускорений при транспортировке секции 15Т535 и 15Т536  
с завода-изготовителя на СИП

Таблица Г.1 – СКО процесса ускорений для параметра UX5 (агрегат 15Т535)

| Скорость движения секции | Диапазон частот, Гц |                     |      |                     |                     |      |                     |                     |      |                     |                     |      |
|--------------------------|---------------------|---------------------|------|---------------------|---------------------|------|---------------------|---------------------|------|---------------------|---------------------|------|
|                          | 0,5 – 20            |                     |      | 0,5 - 40            |                     |      | 0,5 - 60            |                     |      | 0,5 - 100           |                     |      |
|                          | S, м/с <sup>2</sup> | f <sub>с</sub> , Гц | β    | S, м/с <sup>2</sup> | f <sub>с</sub> , Гц | β    | S, м/с <sup>2</sup> | f <sub>с</sub> , Гц | β    | S, м/с <sup>2</sup> | f <sub>с</sub> , Гц | β    |
| 5                        | 0.02                | 10.7                | 1.40 | 0.03                | 20.0                | 1.52 | 0.04                | 41.6                | 1.27 | 0.06                | 59.4                | 1.20 |
| 10                       | 0.03                | 10.5                | 1.47 | 0.04                | 23.4                | 1.40 | 0.08                | 46.9                | 1.15 | 0.13                | 67.1                | 1.11 |
| 15                       | 0.04                | 10.2                | 1.54 | 0.06                | 24.4                | 1.36 | 0.11                | 47.7                | 1.12 | 0.19                | 67.0                | 1.10 |
| 20                       | 0.04                | 10.2                | 1.55 | 0.06                | 25.7                | 1.31 | 0.12                | 46.7                | 1.13 | 0.20                | 66.1                | 1.11 |
| 25                       | 0.05                | 10.9                | 1.47 | 0.09                | 27.6                | 1.25 | 0.18                | 48.7                | 1.09 | 0.28                | 63.3                | 1.10 |
| 30                       | 0.06                | 10.2                | 1.62 | 0.08                | 26.3                | 1.31 | 0.16                | 47.4                | 1.12 | 0.28                | 65.6                | 1.09 |
| 35                       | 0.06                | 8.73                | 1.80 | 0.09                | 27.5                | 1.27 | 0.19                | 48.7                | 1.09 | 0.35                | 65.9                | 1.07 |
| 40                       | 0.06                | 9.93                | 1.68 | 0.09                | 26.2                | 1.31 | 0.18                | 47.9                | 1.10 | 0.32                | 65.5                | 1.09 |
| 45                       | 0.06                | 9.83                | 1.64 | 0.09                | 26.9                | 1.28 | 0.18                | 48.5                | 1.10 | 0.31                | 66.1                | 1.09 |
| 50                       | 0.06                | 8.45                | 1.77 | 0.09                | 26.5                | 1.33 | 0.18                | 48.3                | 1.10 | 0.33                | 65.9                | 1.08 |
| 55                       | 0.06                | 8.81                | 1.82 | 0.09                | 24.2                | 1.39 | 0.19                | 48.6                | 1.10 | 0.36                | 66.6                | 1.08 |
| 60                       | 0.07                | 7.76                | 2.02 | 0.11                | 25.8                | 1.32 | 0.22                | 48.0                | 1.11 | 0.41                | 66.2                | 1.08 |
| 65                       | 0.07                | 8.97                | 1.82 | 0.11                | 25.7                | 1.36 | 0.22                | 49.0                | 1.10 | 0.39                | 65.9                | 1.08 |
| 70                       | 0.08                | 8.32                | 1.99 | 0.10                | 20.4                | 1.60 | 0.21                | 48.6                | 1.11 | 0.38                | 66.5                | 1.08 |
| 75                       | 0.08                | 6.90                | 2.16 | 0.10                | 21.6                | 1.53 | 0.20                | 48.8                | 1.12 | 0.38                | 67.1                | 1.09 |
| 80                       | 0.07                | 6.41                | 2.10 | 0.10                | 23.9                | 1.42 | 0.19                | 47.2                | 1.14 | 0.38                | 67.4                | 1.08 |
| 85                       | 0.09                | 6.25                | 1.92 | 0.11                | 22.2                | 1.60 | 0.16                | 41.9                | 1.24 | 0.38                | 68.4                | 1.08 |
| Огибающая                | 0.09                | 6.25                | 1.92 | 0.11                | 25.8                | 1.32 | 0.22                | 49.0                | 1.10 | 0.41                | 66.2                | 1.08 |

Таблица Г.2 – СКО процесса ускорений для параметра УУ4 (агрегат 15Т535)





## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

### Пиковые значения ускорений при транспортировке секции 15Т535 и 15Т536

Таблица Д.1 – Пиковые значения ускорений для параметра UX5 (агрегат 15Т535)

| Скорость движения секции | S, м/с <sup>2</sup> | Пиковые значения ускорений, м/с <sup>2</sup> , с доверительной вероятностью |                      |                       |                      |
|--------------------------|---------------------|---|----------------------|-----------------------|----------------------|
|                          |                     | 0,95  |                      | 0,00005               |                      |
|                          |                     | Максимальное значение   | Минимальное значение | Максимальное значение | Минимальное значение |
| 5                        | 0.06                | 0.09  | -0.09                | 0.43                  | -0.43                |
| 10                       | 0.14                | 0.22  | -0.22                | 0.98                  | -0.96                |
| 15                       | 0.20                | 0.33  | -0.33                | 1.63                  | -1.63                |
| 20                       | 0.20                | 0.32  | -0.32                | 1.83                  | -1.74                |
| 25                       | 0.28                | 0.46  | -0.40                | 2.50                  | -2.33                |
| 30                       | 0.28                | 0.46  | -0.46                | 2.45                  | -2.28                |
| 35                       | 0.35                | 0.55  | -0.55                | 2.90                  | -2.77                |
| 40                       | 0.32                | 0.52  | -0.52                | 2.92                  | -2.79                |
| 45                       | 0.34                | 0.54  | -0.54                | 2.76                  | -2.63                |
| 50                       | 0.35                | 0.56  | -0.56                | 3.02                  | -2.87                |
| 55                       | 0.37                | 0.59  | -0.59                | 2.88                  | -2.73                |
| 60                       | 0.42                | 0.67  | -0.67                | 3.34                  | -3.18                |
| 65                       | 0.39                | 0.63  | -0.63                | 3.38                  | -3.15                |
| 70                       | 0.40                | 0.64  | -0.64                | 3.12                  | -3.04                |
| 75                       | 0.39                | 0.63  | -0.63                | 3.14                  | -3.06                |
| 80                       | 0.41                | 0.65  | -0.65                | 3.27                  | -3.19                |
| 85                       | 0.37                | 0.59  | -0.59                | 2.82                  | -2.74                |

Таблица Д.2 – Пиковые значения ускорений для параметра УУ4 (агрегат 15Т535)

| Скорость движения секции | S, м/с <sup>2</sup> | Пиковые значения ускорений, м/с <sup>2</sup> , с доверительной вероятностью |                      |                       |                      |
|--------------------------|---------------------|---|----------------------|-----------------------|----------------------|
|                          |                     | 0,95  |                      | 0,00005               |                      |
|                          |                     | Максимальное значение   | Минимальное значение | Максимальное значение | Минимальное значение |
| 5                        | 0.11                | 0.18  | -0.18                | 0.86                  | -0.84                |
| 10                       | 0.23                | 0.37  | -0.37                | 1.94                  | -1.98                |
| 15                       | 0.33                | 0.46  | -0.46                | 3.20                  | -3.14                |
| 20                       | 0.35                | 0.49  | -0.49                | 3.81                  | -3.74                |
| 25                       | 0.52                | 0.73  | -0.73                | 4.89                  | -5.10                |
| 30                       | 0.50                | 0.70  | -0.70                | 5.24                  | -5.34                |
| 35                       | 0.62                | 0.87  | -0.87                | 5.93                  | -5.93                |
| 40                       | 0.58                | 0.81  | -0.81                | 5.92                  | -5.92                |
| 45                       | 0.57                | 0.92  | -0.80                | 5.61                  | -5.50                |
| 50                       | 0.62                | 0.99  | -0.86                | 6.05                  | -6.05                |
| 55                       | 0.63                | 1.01  | -0.89                | 5.71                  | -5.71                |
| 60                       | 0.71                | 1.13  | -0.99                | 6.22                  | -6.22                |
| 65                       | 0.67                | 1.07  | -0.93                | 6.27                  | -6.27                |
| 70                       | 0.72                | 1.15  | -1.01                | 6.63                  | -6.91                |
| 75                       | 0.71                | 1.13  | -0.99                | 6.37                  | -6.37                |
| 80                       | 0.71                | 1.13  | -0.99                | 6.77                  | -6.63                |
| 85                       | 0.60                | 0.96  | -0.96                | 4.69                  | -4.93                |

Таблица Д.3 – Пиковые значения ускорений для параметра UY5 (агрегат 15Т535)

| Скорость движения секции | S, м/с <sup>2</sup> | Пиковые значения ускорений, м/с <sup>2</sup> , с доверительной вероятностью |                      |                       |                      |
|--------------------------|---------------------|---|----------------------|-----------------------|----------------------|
|                          |                     | 0,95  |                      | 0,00005               |                      |
|                          |                     | Максимальное значение   | Минимальное значение | Максимальное значение | Минимальное значение |
| 5                        | 0.12                | 0.19  | -0.19                | 1.03                  | -0.98                |
| 10                       | 0.25                | 0.40  | -0.40                | 1.87                  | -1.56                |
| 15                       | 0.37                | 0.58  | -0.58                | 2.85                  | -2.63                |
| 20                       | 0.38                | 0.61  | -0.53                | 3.49                  | -2.96                |
| 25                       | 0.54                | 0.86  | -0.86                | 4.39                  | -3.96                |
| 30                       | 0.51                | 0.82  | -0.82                | 4.49                  | -4.08                |
| 35                       | 0.63                | 1.01  | -1.01                | 5.28                  | -5.15                |
| 40                       | 0.60                | 0.97  | -0.97                | 5.32                  | -4.84                |
| 45                       | 0.62                | 0.99  | -0.99                | 5.18                  | -4.69                |
| 50                       | 0.65                | 1.05  | -1.05                | 5.63                  | -4.97                |
| 55                       | 0.67                | 1.07  | -1.07                | 5.10                  | -4.56                |
| 60                       | 0.78                | 1.25  | -1.25                | 6.25                  | -5.94                |
| 65                       | 0.72                | 1.15  | -1.15                | 6.02                  | -5.30                |
| 70                       | 0.75                | 1.19  | -1.19                | 5.81                  | -5.37                |
| 75                       | 0.75                | 1.21  | -1.21                | 5.58                  | -5.27                |
| 80                       | 0.81                | 1.30  | -1.30                | 6.64                  | -6.16                |
| 85                       | 0.72                | 1.15  | -1.15                | 4.73                  | -4.44                |



Таблица Д.4 – Пиковые значения ускорений для параметра UZ4 (агрегат 15Т535)

| Скорость движения секции | S, м/с <sup>2</sup> | Пиковые значения ускорений, м/с <sup>2</sup> , с доверительной вероятностью |                      |                       |                      |
|--------------------------|---------------------|---|----------------------|-----------------------|----------------------|
|                          |                     | 0,95  |                      | 0,00005               |                      |
|                          |                     | Максимальное значение   | Минимальное значение | Максимальное значение | Минимальное значение |
| 5                        | 0.07                | 0.11  | -0.11                | 0.56                  | -0.57                |
| 10                       | 0.14                | 0.23  | -0.23                | 1.03                  | -0.91                |
| 15                       | 0.20                | 0.32  | -0.32                | 1.67                  | -1.59                |
| 20                       | 0.21                | 0.33  | -0.33                | 1.79                  | -1.92                |
| 25                       | 0.30                | 0.47  | -0.41                | 2.60                  | -2.60                |
| 30                       | 0.30                | 0.48  | -0.48                | 2.61                  | -2.73                |
| 35                       | 0.39                | 0.62  | -0.62                | 3.12                  | -3.20                |
| 40                       | 0.36                | 0.57  | -0.57                | 2.99                  | -3.06                |
| 45                       | 0.35                | 0.57  | -0.57                | 2.83                  | -2.83                |
| 50                       | 0.37                | 0.59  | -0.59                | 2.90                  | -2.97                |
| 55                       | 0.38                | 0.61  | -0.61                | 2.83                  | -2.90                |
| 60                       | 0.43                | 0.69  | -0.69                | 3.25                  | -3.25                |
| 65                       | 0.40                | 0.64  | -0.64                | 3.06                  | -3.14                |
| 70                       | 0.44                | 0.71  | -0.71                | 3.38                  | -3.38                |
| 75                       | 0.44                | 0.70  | -0.70                | 3.32                  | -3.32                |
| 80                       | 0.43                | 0.69  | -0.69                | 3.36                  | -3.36                |
| 85                       | 0.38                | 0.61  | -0.61                | 2.77                  | -2.69                |

Таблица Д.5 – Пиковые значения ускорений для параметра UZ5 (агрегат 15Т535)

| Скорость движения секции | S, м/с <sup>2</sup> | Пиковые значения ускорений, м/с <sup>2</sup> , с доверительной вероятностью |                      |                       |                      |
|--------------------------|---------------------|---|----------------------|-----------------------|----------------------|
|                          |                     | 0,95  |                      | 0,00005               |                      |
|                          |                     | Максимальное значение   | Минимальное значение | Максимальное значение | Минимальное значение |
| 5                        | 0.14                | 0.32  | -0.32                | 1.33                  | -1.43                |
| 10                       | 0.26                | 0.51  | -0.51                | 3.02                  | -2.71                |
| 15                       | 0.46                | 0.92  | -0.92                | 4.12                  | -4.12                |
| 20                       | 0.45                | 0.99  | -0.99                | 4.48                  | -4.3                 |
| 25                       | 0.65                | 1.42  | -1.42                | 5.94                  | -5.81                |
| 30                       | 0.62                | 1.24  | -1.24                | 5.8                   | -6.05                |
| 35                       | 0.71                | 1.41  | -1.41                | 6.5                   | -6.36                |
| 40                       | 0.71                | 1.42  | -1.28                | 6.12                  | -5.98                |
| 45                       | 0.76                | 1.51  | -1.36                | 5.6                   | -5.75                |
| 50                       | 0.77                | 1.54  | -1.38                | 6.14                  | -5.99                |
| 55                       | 0.79                | 1.58  | -1.42                | 6                     | -5.84                |
| 60                       | 0.86                | 1.54  | -1.54                | 6.34                  | -6.17                |
| 65                       | 0.83                | 1.65  | -1.49                | 6.78                  | -6.78                |
| 70                       | 0.88                | 1.58  | -1.58                | 6.66                  | -6.48                |
| 75                       | 0.81                | 1.45  | -1.45                | 6.14                  | -5.98                |
| 80                       | 0.9                 | 1.8   | -1.62                | 8.66                  | -8.48                |
| 85                       | 0.86                | 1.72  | -1.72                | 6.37                  | -6.89                |

Таблица Д.6 – Экстремальные (пиковые) значения ускорений

| Параметр | Агрегат | S, м/с <sup>2</sup> | Пиковые значения ускорений, м/с <sup>2</sup> , с доверительной вероятностью |                      |                       |                      |
|----------|---------|---------------------|---|----------------------|-----------------------|----------------------|
|          |         |                     | 0,95  |                      | 0,00005               |                      |
|          |         |                     | Максимальное значение   | Минимальное значение | Максимальное значение | Минимальное значение |
| UX5      | 15А535  | 0.42                | 0.67  | -0.67                | 3.34                  | -3.18                |
| UY4      |         | 0.71                | 1.13  | -0.99                | 6.77                  | -6.63                |
| UY5      |         | 0.81                | 1.30  | -1.30                | 6.64                  | -6.16                |
| UZ4      |         | 0.44                | 0.71  | -0.71                | 3.38                  | -3.38                |
| UZ5      |         | 0.9                 | 1.8   | -1.62                | 8.66                  | -8.48                |

Таблица Д.7 – Экстремальные (пиковые) значения ускорений для нестационарных участков движения

| Параметр | Агрегат | S, м/с <sup>2</sup> | Пиковые значения ускорений, м/с <sup>2</sup> , с доверительной вероятностью |                      |                       |                      |
|----------|---------|---------------------|---|----------------------|-----------------------|----------------------|
|          |         |                     | 0,95  |                      | 0,00005               |                      |
|          |         |                     | Максимальное значение   | Минимальное значение | Максимальное значение | Минимальное значение |
| UX5      | 15A535  | 0.33                | 0.46  | -0.46                | 3.41                  | -3.28                |
| UY4      |         | 0.58                | 0.81  | -0.81                | 6.80                  | -6.80                |
| UY5      |         | 0.60                | 0.97  | -0.85                | 6.04                  | -5.68                |
| UZ4      |         | 0.33                | 0.54  | -0.47                | 3.35                  | -3.35                |
| UZ5      |         | 3.65                | 1.46  | -0.73                | 29.2                  | -40.9                |
| UX4      | 15A536  | 0.17                | 0.24  | -0.24                | 2.21                  | -2.25                |
| UX5      |         | 0.29                | 0.46  | -0.46                | 2.46                  | -2.46                |
| UY4      |         | 0.73                | 1.16  | -1.02                | 7.42                  | -7.13                |
| UY5      |         | 1.05                | 1.68  | -1.47                | 9.88                  | -9.46                |
| UY6      |         | 0.65                | 1.04  | -0.91                | 6.23                  | -5.97                |
| UZ4      |         | 0.89                | 1.25  | -1.25                | 9.66                  | -9.84                |
| UZ5      |         | 0.68                | 1.09  | -1.09                | 6.43                  | -6.30                |
| UZ6      |         | 0.34                | 0.55  | -0.55                | 2.27                  | -2.20                |

# ПРИЛОЖЕНИЕ Е

## Функция распределения значений ускорений при транспортировке секции 15Т535 и 15Т536 за всё время движения

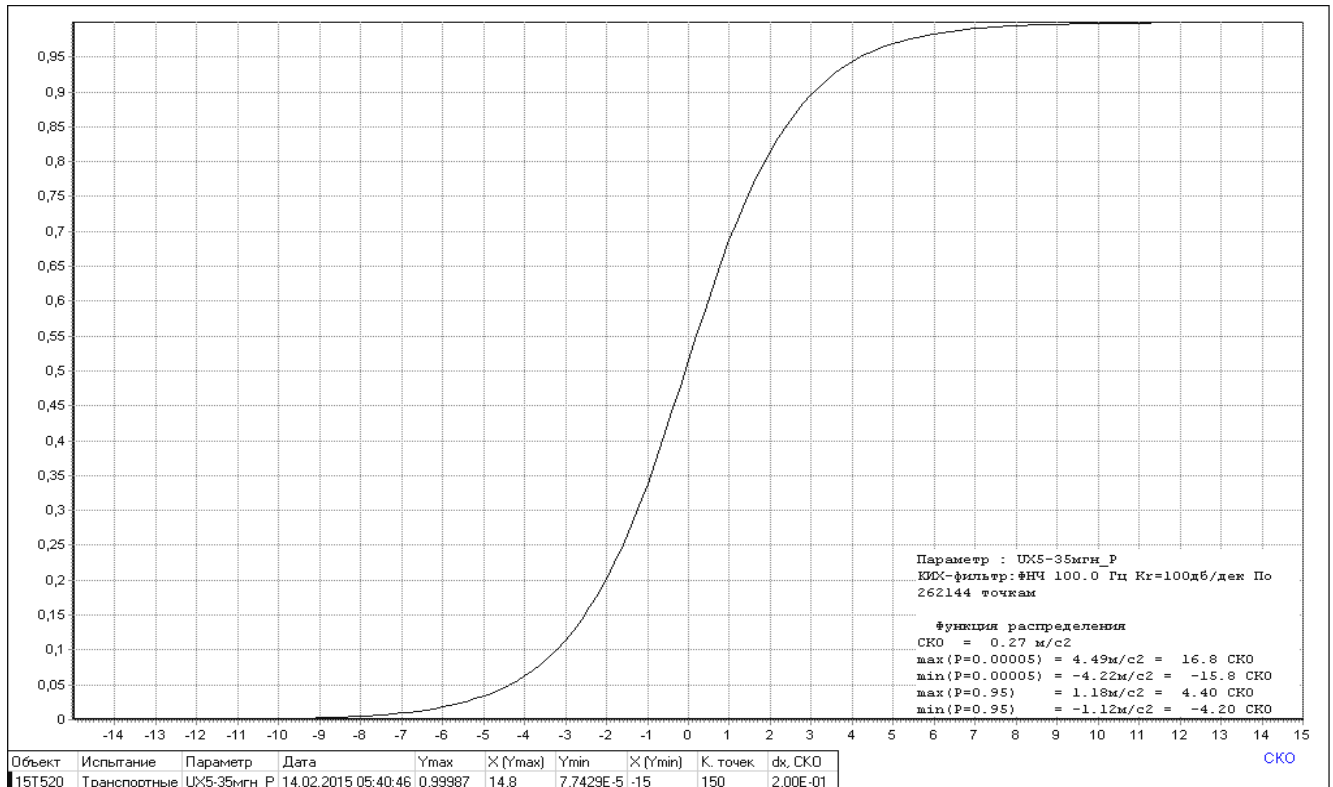


Рисунок Е.1 – Функция распределения процессов ускорений для параметра UX5 (агрегат 15Т535)

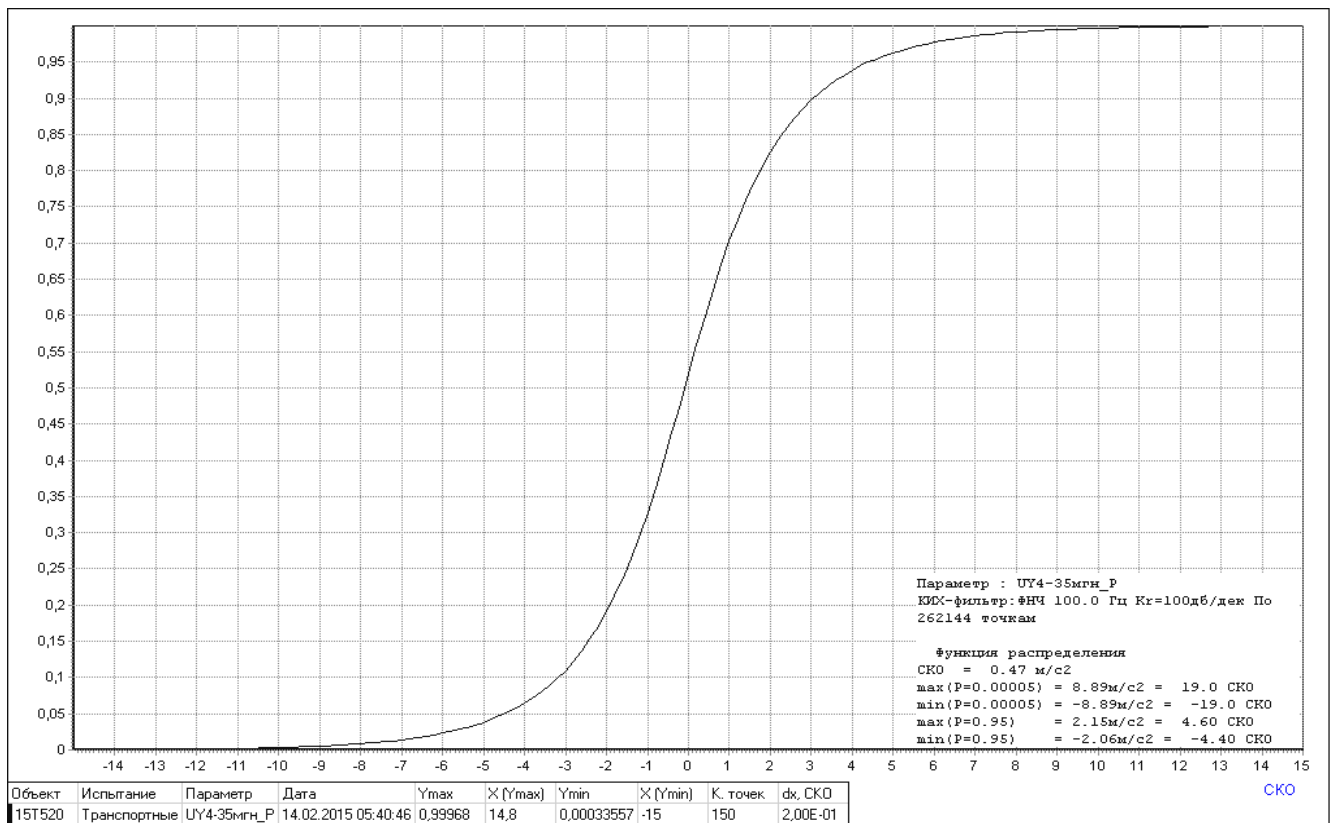


Рисунок Е.2– Функция распределения процессов ускорений для параметра UY4 (агрегат 15T535)

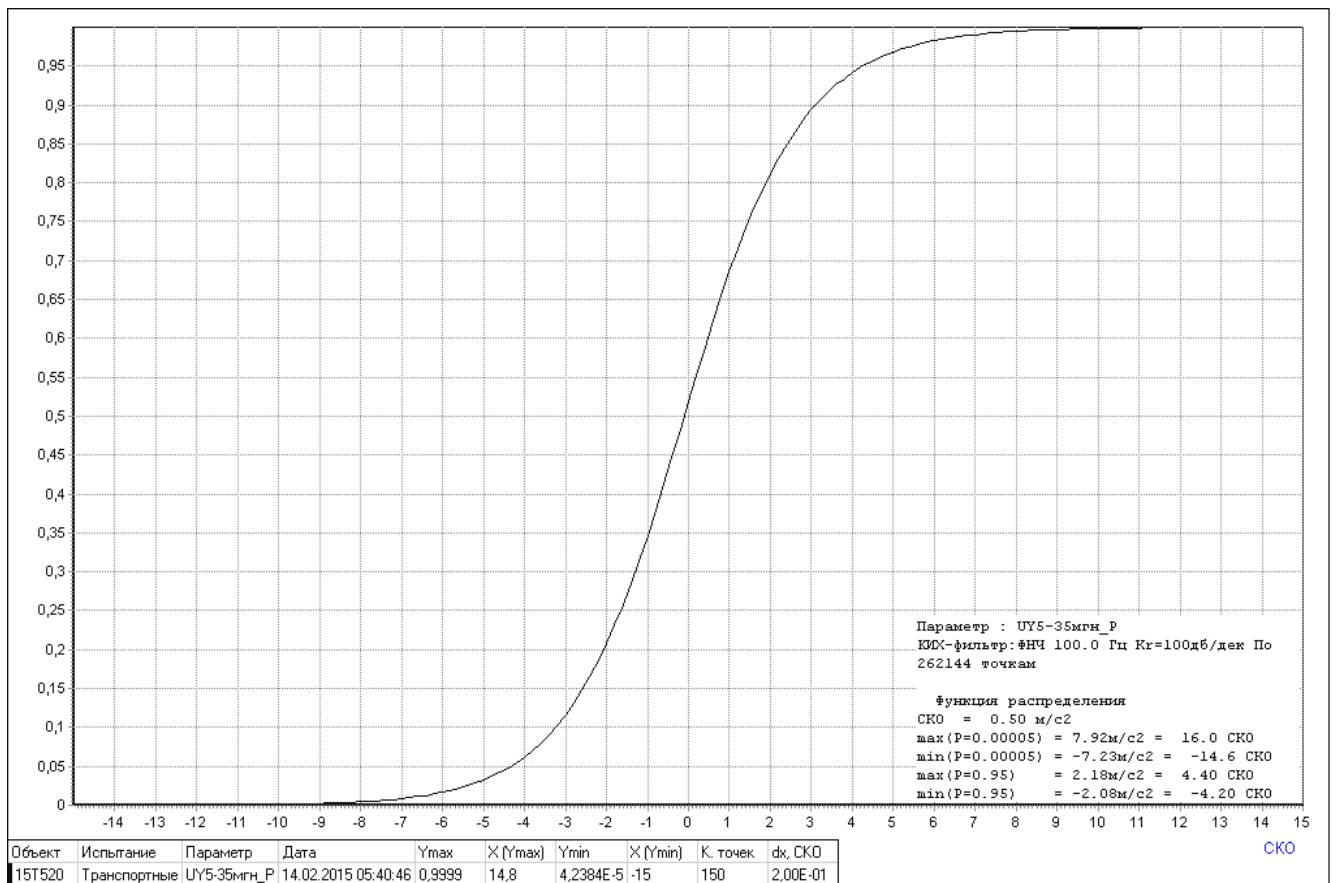


Рисунок Е.3 – Функция распределения процессов ускорений для параметра UY5 (агрегат 15T535)

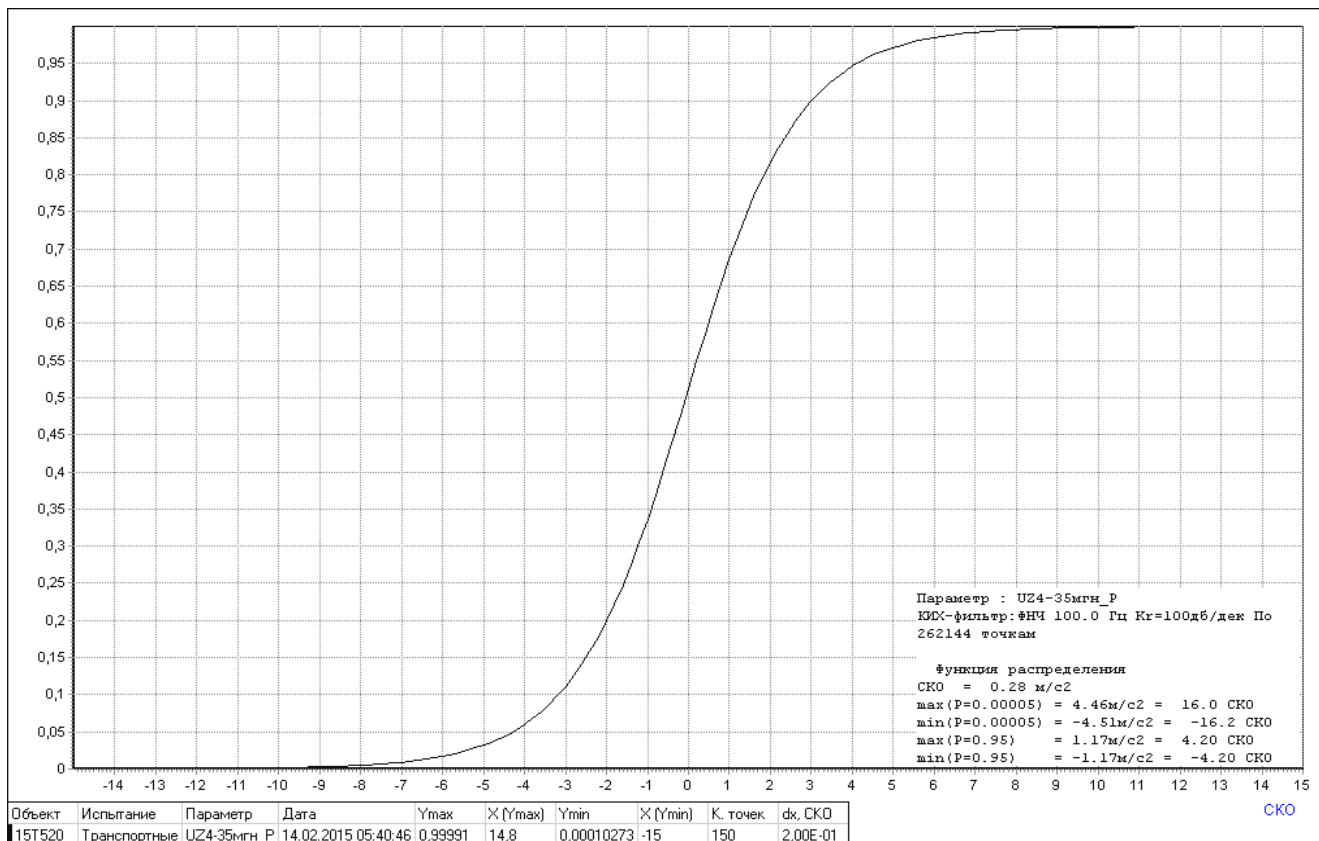


Рисунок Е.4 – Функция распределения процессов ускорений для параметра UZ4 (агрегат 15T535)

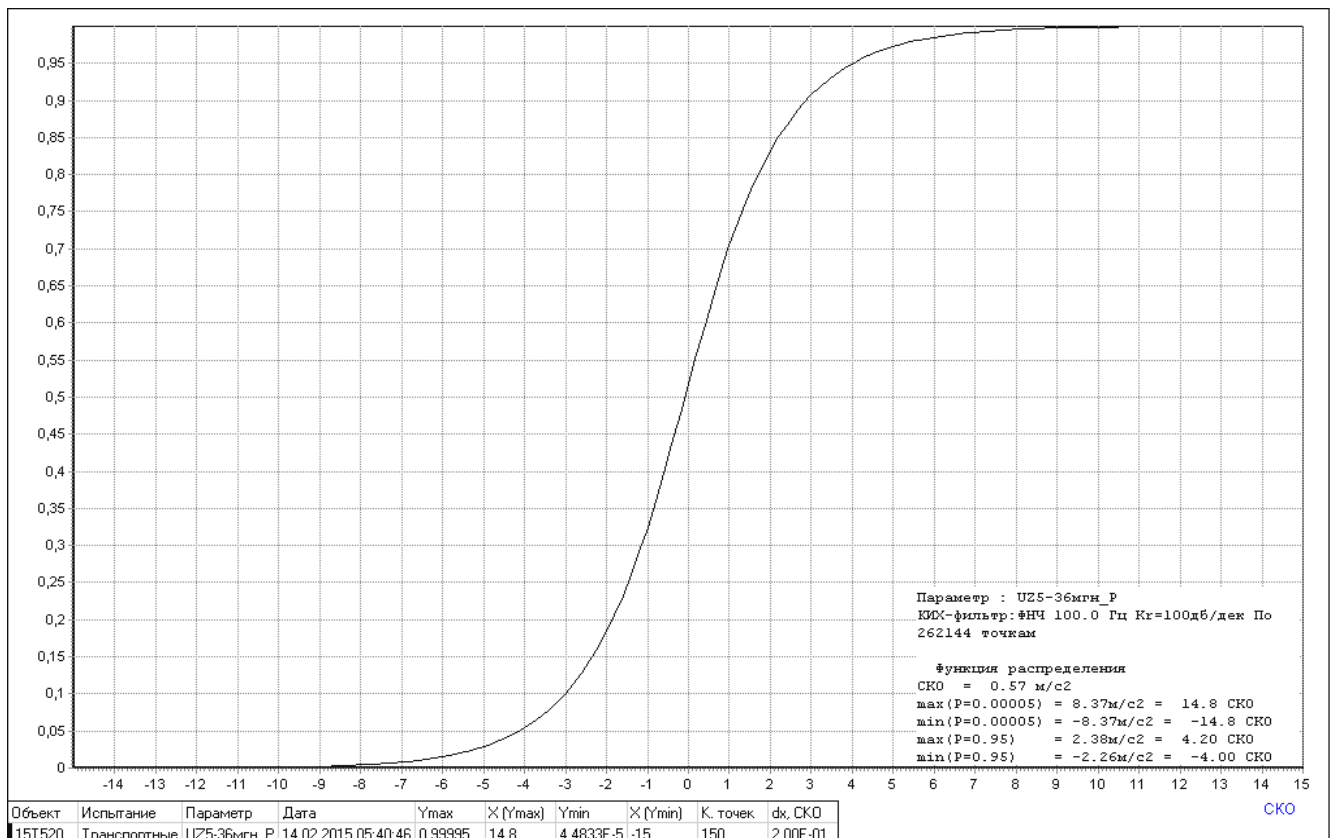


Рисунок Е.5 – Функция распределения процессов ускорений для параметра UZ5 (агрегат 15Т536)



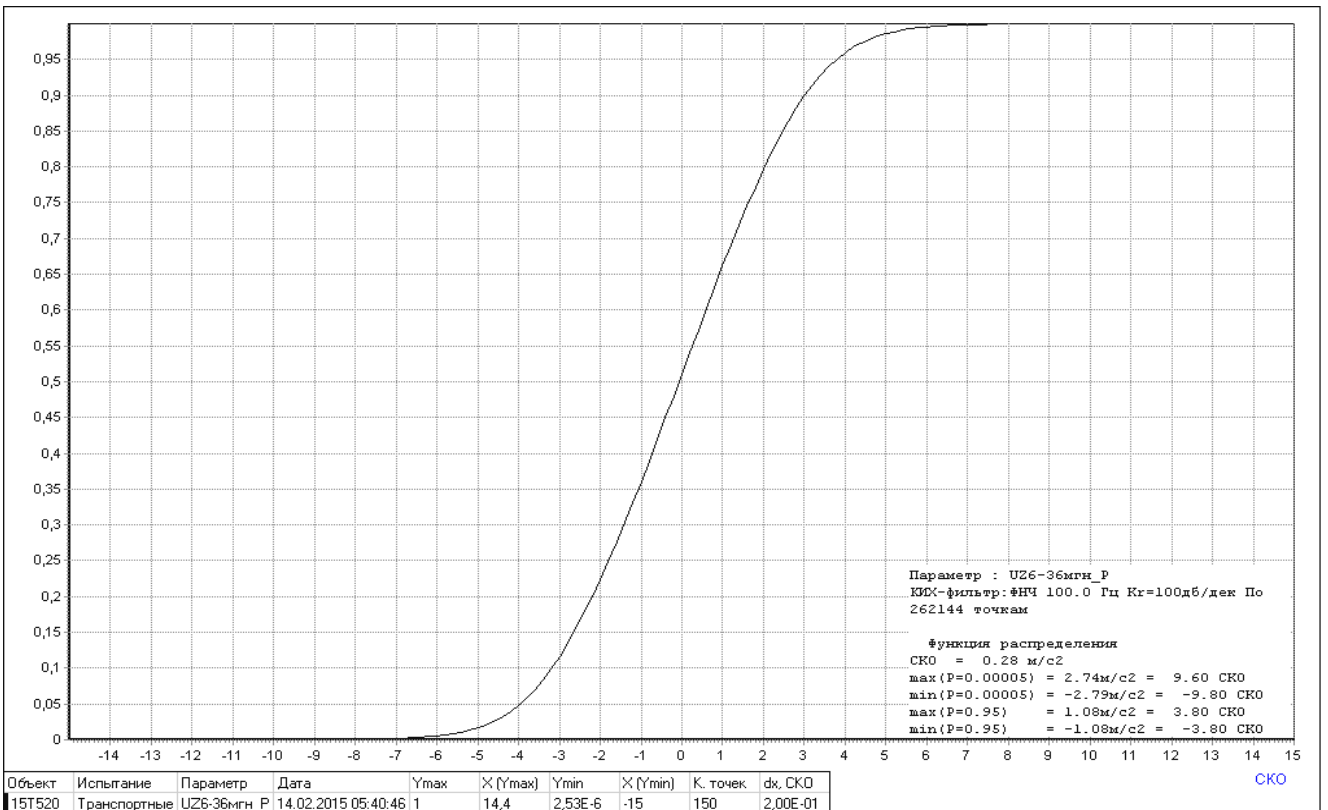


Рисунок Е.6 – Функция распределения процессов ускорений для параметра UZ5 (агрегат 15T535)

## ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

### Листинг программы «Мах\_Sko»

[Cicl]

TS=DPTask

delete /b 1 999

SvText SKOmax.txt /new /Text

SvText SKOmax.txt /Text

SvText SKOmax.txt /Text

SvText SKOmax.txt /left 20 /Text 0,3-20

string f:='UX4-36'

int num:=1

#Run Section rdr

string f:='UX5-35'

int num:=2

#Run Section rdr

string f:='UX5-36'

int num:=3

#Run Section rdr

string f:='UY4-35'

int num:=4

#Run Section rdr

|             |             |                 |                |             |   |             |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|---|-------------|
|             |             |                 |                |             | <i>КЭ-476.12.03.01.2018. 114-284. ВКР</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |   | <i>90</i>   |

string f:='UY4-36'

int num:=5

#Run Section rdr

string f:='UY5-35'

int num:=6

#Run Section rdr

string f:='UY5-36'

int num:=7

#Run Section rdr

string f:='UY6-36'

int num:=8

#Run Section rdr

string f:='UZ4-35'

int num:=9

#Run Section rdr

string f:='UZ4-36'

int num:=10

#Run Section rdr

string f:='UZ5-35'

int num:=11

#Run Section rdr

|             |             |                 |                |             |  |             |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|--|-------------|
|             |             |                 |                |             | <i>КЭ-4 76.12.03.01.2018. 114-284. ВКР</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |  | <i>91</i>   |

string f:='UZ5-36'

int num:=12

#Run Section rdr

string f:='UZ6-36'

int num:=13

#Run Section rdr

[RDR]

TS=dPTask

/string strName:=Passp(/sect head /ident name /a ->num)

RdXY ->F+'CKO.TXT' /Y /YCol 3 /StartStr 8 /FinishStr 24 /name ->f /n ->num

setpasp /a ->num

Stat /a ->num

float floatSKOmax[1]:=Passp(/sect Extrems /ident Ymax /a ->num /type float)

RdXY ->F+'CKO.TXT' /Y /YCol 7 /StartStr 8 /FinishStr 24 /name ->f /n ->num

setpasp /a ->num

Stat /a ->num

float floatSKOmax[2]:=Passp(/sect Extrems /ident Ymax /a ->num /type float)

RdXY ->F+'CKO.TXT' /Y /YCol 3 /StartStr 33 /FinishStr 49 /name ->f /n ->num

setpasp /a ->num

Stat /a ->num

float floatSKOmax[3]:=Passp(/sect Extrems /ident Ymax /a ->num /type float)

|      |      |          |         |      |                                     |      |
|------|------|----------|---------|------|-------------------------------------|------|
|      |      |          |         |      | КЭ-4 76.12.03.01.2018. 114-284. ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                                     | 92   |

RdXY ->F+'CKO.TXT' /Y /YCol 7 /StartStr 33 /FinishStr 49 /name ->f /n ->num

setpasp /a ->num

Stat /a ->num

float floatSKOmax[4]:=Passp(/sect Extrems /ident Ymax /a ->num /type float)

strSKOmax:=Format('%f %f %f %f %f')

%f,[floatSKOmax[1],floatSKOmax[2],floatSKOmax[3],floatSKOmax[4]])

SvText SKOmax.txt /left 6 /Text ->f ->strSKOmax

|             |             |                 |                |             |   |             |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|---|-------------|
|             |             |                 |                |             | <i>КЭ-476.12.03.01.2018. 114-284. ВКР</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |   | <i>93</i>   |