

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ГЕОТЕХНИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ  
им. Н.С. ПОЛЯКОВА**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНТРОЛЬ ДИНАМИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ  
ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**Монография**

Днепропетровск  
НГУ  
2015

УДК 004.94:550.3:622.831.3:681.178

ББК 33м

М 74

Затверджено вченою радою Державного ВНЗ «Національний гірничий університет» (протокол № 11 від 29.12.2014).

**Рецензенти:**

О.І. Михальов, д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри інформаційних технологій і систем Національної металургійної академії України;

Л.В. Коломоєць, д-р техн. наук, проф., ректор Одеської державної академії технічного регулювання та якості, перший віце-президент Міжнародної академії стандартизації.

**М74** **Моделирование** и контроль динамических процессов в задачах оценки состояния геотехнических систем = Modeling and control of dynamic processes in assessments of the conditions of geotechnical systems: монографія / Н.А. Иконникова, В.И. Корсун, А.И. Слащев, Алекс. А. Яланский, А.А. Яланский; М-во образования и науки Украины, Нац. горн. ун-т. – Днепропетровск: НГУ, 2015. – 279 с.

ISBN 978-966-350-546-6

Посвящена решению актуальной научно-прикладной проблемы моделирования и контроля динамических процессов в задачах оценки состояния геотехнических систем. Потеря устойчивости таких систем может быть мягкой или жесткой. Бифуркации являются ключевым фактором пространственно-временной самоорганизации, они возникают, прежде всего, в открытых системах, в которые возможен приток внешней энергии, например, в результате проявлений горного давления, короткого замыкания, что может приводить к весьма тяжелым последствиям.

Рассмотрены особенности математического и компьютерного моделирования динамических процессов на основе гравитационных и пружинных маятников, генераторов детерминированного хаоса, а также особенности их автоматизированного или автоматического контроля в режиме реального времени на базе аналого-цифровых и микропроцессорных устройств.

Результаты исследований использованы при разработке рамно-анкерных крепей для больших глубин на основе сталеполимерных анкеров, методов и средств автоматизированного геофизического контроля, диагностике и ремонте тоннелей, плотин, насосных станций, подземных и наземных сооружений.

Предназначена для инженеров, научных сотрудников, аспирантов и студентов вузов горнодобывающей промышленности.

Ил. 99. Табл. 15. Библиогр: 163 наим.

УДК 004.94:550.3:622.831.3:681.178

ББК 33м

© Н.А. Іконнікова, В.І. Корсун, А.І. Слащов,  
О.А. Яланський, А.О. Яланський, 2015

© Державний ВНЗ «Національний гірничий  
університет», 2015

© Інститут геотехнічної механіки  
ім. М.С. Полякова, 2015

ISBN 978-966-350-546-6

---

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ЕЕ РЕШЕНИЯ .....	7
1.1 Математические модели в задачах оценки статического и динамического состояний геотехнических систем.....	7
1.2 Потеря устойчивости равновесных и автоколебательных режимов – исходные информативные параметры в «сценарии» хаотизации процессов .....	15
1.3 Автоматизированные системы контроля параметров породного массива и технологических процессов горного производства.....	23
1.4 Методы оперативного и автоматизированного контроля приконтурного массива горных пород в геомеханике .....	29
1.5 Выводы по разделу .....	31
2 ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ.....	34
2.1 Компьютерное моделирование динамических процессов в технических системах на основе генераторов хаоса.....	34
2.2 Определение особенностей математического моделирования динамических процессов на основе трех связанных гравитационных маятников с маховиком .....	40
2.3 Исследование и анализ динамических процессов в протяженных геотехнических системах на основе пружинных маятников.....	61
2.4 Выводы по разделу .....	77
3 ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СРЕДСТВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	79
3.1 Обоснование параметров генератора динамического хаоса, реализующего систему уравнений Лоренца.....	79
3.2 Апробация экспериментального генератора динамического хаоса как средства натурального моделирования .....	97
3.3 Выводы по разделу .....	113
4 ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ СЛОИСТОГО МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД.....	114
4.1 Массив горных пород, ударные волны, колебания и колебательные системы, резонансные явления в блоковых и плоскопараллельных структурах .....	114
4.2 Методика вертикальных акустических зондирований глубинного строения приконтурного массива горных пород.....	126
4.3 Структура программного обеспечения автоматизированной системы контроля и сигнализации.....	132
4.4 Выводы по разделу .....	137
5 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ, МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ.....	138
5.1 Цифровая обработка акустических сигналов: математический аппарат и алгоритмическое обеспечение .....	138
5.2 Особенности реализации быстрого преобразования Фурье методом двенадцати ординат для обработки данных автоматизированного виброакустического контроля в двоичном коде .....	145

---

5.3 Моделирование процесса обработки виброакустических сигналов предложенными методами и оценка их точности .....	150
5.4 Автоматизированная обработка результатов измерений.....	158
5.4.1 Исследование технологических процессов проведения горных выработок методами математической статистики.....	158
5.4.2 Спектральный анализ виброакустических сигналов, в том числе представленных графически .....	162
5.5 Выводы по разделу .....	165
<b>6 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ.....</b>	<b>167</b>
6.1 Разработка аналого-цифровых приборов-индикаторов оперативного контроля системы типа «крепь-массив» .....	167
6.2 Разработка цифровых устройств автоматизированного контроля на основе микропроцессоров и микроконтроллеров .....	174
6.2.1 Определение минимально необходимых вычислительных мощностей аппаратных средств в приложении к конкретным задачам измерений.....	174
6.2.2 Оценка амплитудных, частотных и временных характеристик акустических импульсов в микропроцессорных приборах оперативного контроля и контроллерах нижнего уровня автоматизированных систем.....	182
6.3 Автоматизация метрологической поверки средств контроля на основе персональной ЭВМ .....	192
6.4 Выводы по разделу .....	201
<b>7 АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ КОНТРОЛЯ СИСТЕМЫ "КРЕПЬ-ПОРОДНЫЙ МАССИВ" .....</b>	<b>203</b>
7.1 Контроль состояния крепи подземных выработок.....	203
7.2 Контроль состояния тоннельных обделок и заобделочных пустот .....	210
7.3 Спектральный анализ динамических процессов в сложных системах .....	218
7.4 Совершенствование цифрового устройства, реализующего многоканальный контроль геотехнических систем.....	225
7.5 Выводы по разделу .....	232
<b>8 АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ РЕШЕНИИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ЗАДАЧ.....</b>	<b>234</b>
8.1 Особенности крепления и поддержания подготовительных выработок в сложных горно-геологических условиях глубоких угольных шахт .....	234
8.2 Моделирование процесса хаотизации при бурении шпуров для установки анкеров с целью повышения их устойчивости на основе упрощенной модели трехплечевых гравитационных маятников.....	237
8.3 Оценка влияния формы стенок шпура на работоспособность сталеполимерного анкера методом конечных элементов.....	247
8.4 Моделирование динамических процессов для оценки их влияния на состояние протяженных подготовительных выработок на основе k-массовой системы пружинных маятников .....	258
8.5 Выводы по разделу .....	267
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>268</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>	<b>273</b>

---

## ВВЕДЕНИЕ

---

Украина владеет значительной сырьевой базой твердых полезных ископаемых, поэтому существенную роль в экономике страны играют горнодобывающие отрасли. Однако увеличение глубины разработки, сложные горно-геологические условия отработки, в особенности угольных месторождений, в совокупности снижают экономические показатели работы шахт и рудников. В настоящее время развитие интенсивных технологий горных предприятий, увеличение мощности экскаваторов, дробилок, мельниц, механизированных комплексов, повышение нагрузки на забой лавы требует обеспечения надежной и безопасной работы, прежде всего, мощных геотехнических систем.

Горные работы в зависимости от конкретных горно-геологических условий и назначения выработок, горнотехнических и экономических факторов в разной степени обеспечиваются средствами механизации и автоматизации. Уже разработаны автоматизированные комплексы проведения и крепления монолитным бетоном тоннелей метрополитенов, стволов шахт и рудников, в то же время возведение крепи в подготовительных выработках шахт часто выполняется практически вручную, с низким уровнем механизации.

Проведение горных работ – сложный и трудоемкий технологический процесс, включающий отделение и выемку породы или полезного ископаемого, их погрузку, дробление, перемещение, а также крепление и дальнейшее поддержание выработок. При этом происходят процессы преобразования энергии и материалов, естественных деформаций и разрушения элементов выработок и породного массива под влиянием гравитационных, тектонических и техногенных воздействий, вызывающие необходимость выполнения технологических операций формообразования, искусственного упрочнения, крепления и поддержания, перекрепления и консервации выработок.

Устойчивость подземных сооружений определяется геомеханическим состоянием системы «крепь – породный массив», своевременная диагностика элементов которой связана с созданием безопасных условий труда, значительным сокращением расходов на проходку, крепление и поддержание капитальных, подготовительных

---

и очистных выработок, и является необходимым условием обеспечения непрерывности технологического цикла горнодобывающего предприятия.

В сложных условиях обрабатываемых месторождений для контроля устойчивости перспективно применение информативных и эффективных геофизических методов. На современном этапе технического развития, когда практически каждая шахта или рудник имеют систему персональных компьютеров в области управления, целесообразно применение специализированной аппаратуры технологического и геофизического контроля в комплексе с автоматизированной компьютерной обработкой результатов измерений. Поэтому необходимо создание методов и средств контроля на основе современной элементной базы мирового уровня, принципы действия и схемные решения которых могут применяться как в портативных приборах, так и в централизованных системах на основе персональных ЭВМ.

Особо остро стоит задача оценки накопления повреждений в геомеханических системах с целью предупреждения и предотвращения работы в аварийных режимах. Несмотря на высокий уровень выполненных исследований в этом направлении, целый ряд вопросов требует дальнейшей углубленной проработки. Во-первых, необходимо установить причинно-следственные связи между показателями изменения свойств элементов системы под влиянием различных факторов, в том числе и динамических хаотических воздействий, и характеристиками ее работы, которые, безусловно, изменяются в зависимости от технических параметров системы и физико-механических свойств пород. Во-вторых, требует дальнейшего усовершенствования методическая база оценки динамического состояния геотехнической системы в режиме реального времени. И, в-третьих, необходимо заблаговременно обосновать технологические подходы с позиции управления динамическими процессами для обеспечения надежности работы геомеханических систем.

В этой связи математическое моделирование и контроль динамических процессов для решения задач оценки состояния геотехнических систем, обоснование и определение параметров систем, совершенствование средств компьютерного моделирования является актуальной научной проблемой.

---

# 1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ЕЕ РЕШЕНИЯ

---

## 1.1 Математические модели в задачах оценки статического и динамического состояний геотехнических систем

Математические модели – это упрощенные математические описания реальных объектов или процессов, происходящих в них. Их несущественные особенности отбрасываются, исходные сложные задачи сводятся к идеализированным, которые поддаются анализу и математическому описанию. Именно так в классической прикладной математике возникли блоки без трения, невесомые нерастяжимые нити, невязкие жидкости и так далее [70].

Адекватность модели реальному объекту или процессу можно оценить с помощью геометрических и физических критериев подобия. Геометрические критерии предполагают пропорциональное уменьшение размеров модели, а физические критерии – использование реальных характеристик материалов, реальных физических явлений и процессов или адекватного математического описания, как правило, методами математического анализа или математической физики с помощью аналитических функций или дифференциальных уравнений.

Горная геомеханика делит задачи расчета статического напряженно-деформированного состояния на две группы, а именно предельного состояния (определение несущей способности подземных выработок, камер, стволов шахт и рудников, устойчивости карьеров, откосов, насыпей, плотин, фундаментов) и деформационные (расчет осадок грунтовых оснований под нагрузками от зданий и других сооружений, в том числе с учетом фильтрационной консолидации) [112].

При решении краевых задач теории упругости сложно использовать классические аналитические методы, поэтому широко применяют численные методы: метод конечных разностей, вариационно-разностный, методы граничных и конечных элементов. Все эти методы базируются на общих принципах механики сплошных сред и их объединяет необходимость построения дискретных математических моделей рассчитываемых объектов [46, 59, 71, 112].

Наиболее распространенным приближенным методом, который отличается своей универсальностью и наглядностью, является метод конечных элементов (МКЭ). В МКЭ переход к дискретной расчетной схеме осуществляется, в отличие от других методов, из соображений механики. Исследуемая область разбивается на элементы, чаще всего, треугольной формы. Наметились три подхода в решении задач: на основе перемещений (задаются функции, которые аппроксимируют перемещения внутри элемента); на основе сил (задаются функции, которые аппроксимируют напряжения внутри элемента); на смешанных условиях (задаются функции, аппроксимирующие на одной части элемента перемещения, а на другой – напряжения). Механические свойства каждого элемента, а следовательно, всей системы, вводятся на основе реальных параметров, а искомые усилия (перемещения) – из условия кинематической (статической) совместимости системы. Это позволяет естественно сформулировать граничные условия, рационально располагать расчетные узлы сеточной области, свободно сгущая ее в местах возможного большего градиента разрешающей функции, более эффективно применять метод к исследованию комбинированных систем, сопрягаемых из фрагментов различной конфигурации [46, 102, 103, 112].

Основное преимущество МКЭ – легкость восприятия инженерами, наглядность, высокий уровень развития и относительно удовлетворительная оснащенность программами. Поскольку породный массив имеет весьма сложное строение, обусловленное разнообразием структур залегания пластов, слоистостью, их геологической нарушенностью, трещиноватостью, разбросом прочностных свойств, то исследования выполняют в плоской постановке. МКЭ успешно используется и для решения трехмерных задач, но преимущественно в изотропных однородных средах. Фактически МКЭ не просто метод расчёта параметров породного массива и материалов конструкций, а унифицированный аппарат математического моделирования большинства статических физических процессов, происходящих в массиве горных пород или грунте [102, 103]. Однако все эти методы не решают динамические задачи, поскольку они не учитывают время.

О *динамической системе* говорят в том случае, если можно указать такой набор изменяющихся величин, называемых динамическими переменными и характеризующих *состояние*

системы, что их значения в любой последующий момент времени получаются из исходного набора по определенным правилам. Эти правила задает оператор эволюции системы. Если состояние системы задается набором  $N$  величин, то изменение состояния во времени или динамику системы можно представить как движение точки по траектории в  $N$ -мерном фазовом пространстве, которую называют фазовой траекторией (*фазовым портретом*) [61].

Ранее в понятие динамической системы вкладывали чисто механическое содержание, имея в виду набор тел, связанных силовыми взаимодействиями и подчиняющихся системе дифференциальных уравнений, вытекающих из законов Ньютона. *Современное понятие динамической системы* – это результат длительной эволюции научных представлений и синтеза достижений многих дисциплин и *подразумевает возможность задания оператора эволюции любым способом*, не обязательно дифференциальным уравнением. В этом случае под фазовой траекторией следует понимать некоторую дискретную последовательность точек в фазовом пространстве [61, 101].

Выделяют два класса динамических систем – консервативные (к ним относятся механические колебания в отсутствии трения) и диссипативные (механические системы, полная энергия которых при движении убывает, например, переходит в теплоту или рассеивается). Для диссипативных систем характерно то, что режим динамики в течение длительного времени становится независимым от начального состояния [34, 61, 105].

Спонтанное образование и развитие сложных упорядоченных структур в открытых системах называют самоорганизацией, а теорию самоорганизации – *синергетикой* [24, 79, 84, 111, 130]. Последняя, аккумулируя идеи кибернетики, нелинейной оптики и неуравновешенной термодинамики, существенно повлияла на развитие современной физики, химии, наук о Земле. Язык синергетики специфичный и оперирует такими понятиями как бифуркация, критическое состояние, аттрактор, диссипативные структуры, обратные связи, автокатализ, гистерезис, топохимическая память, стохастический и детерминированный хаос. Понятия синергетики и явлений самоорганизации являются конструктивными при создании новых материалов [96].

Выделяют три необходимые (но не всегда достаточные) условия самоорганизации в открытых системах с образованием диссипативных структур: отклонения от равновесия должны превышать критическое значение, т.е. система должна находиться в области существования бифуркаций; объем системы должен быть достаточно большим и превышать критический объем, в котором происходит необходимое количество незатухающих флуктуаций, взаимодействия которых создают упорядоченность в системе; наличие положительной обратной связи [96].

Среди разнообразных диссипативных структур следует отметить: пространственно неоднородные (пористость, слоистость, трещиноватость); периодические во времени (автоколебания); периодические пространственно-временные (волны); сосуществование нескольких стационарных состояний (бистабильность, тристабильность, аттрактор); структуры со скейлинговыми свойствами (пространственно самоподобными – фрактальными); динамические структуры с хаотическим поведением [96]. Особо остановимся на двух последних типах диссипативных структур: фракталах [16, 34, 46, 61, 104, 113] и динамическом хаосе [11, 21, 61, 66, 126, 146 – 151, 155 – 163].

Фрактальные объекты – это множества в одно-, двух-, трехмерных пространствах, обладающие рядом специфических свойств, точно строгого определения которых не существует, можно лишь качественно указать на их типичные черты: наличие тонкой структуры и «изрезанности» деталей сколь угодно малого размера; иррегулярность объектов, не позволяющая описывать их на традиционном геометрическом языке метрических (евклидовых) или топологических пространств; регулярное или стохастическое подобие отдельных частей фрактала всему фракталу – иерархия самоподобия деталей объекта на различных масштабных уровнях; возможность задания программы с помощью несложной рекурсивной процедуры или порождающего алгоритма, ведущей к постепенному измельчению или укрупнению деталей [16].

Природа «придумала» фракталы задолго до появления человека, первый искусственный фрактал – это мозаика на полу церкви в городке Анагни (Италия), построенной в 1104 году. Теперь эта фигура широко известна как «салфетка» Серпинского (1916 год), который один из первых построил геометрическую фигуру с

нецелочисленной дробной размерностью, исходя из простого равностороннего треугольника. К числу фракталов относятся множества Фату (1906 г.), Жюлиа (1918 г.), Мандельброта (1979 г.), «снежинка» Коха (1904 г.), кривые Пеано (1890 г.), Гильберта (1891 г.), «губка» Менгера (1932 год) и так далее [16, 34, 61].

Как утверждает Мандельброт [68], в различных областях науки, которые используют вероятностные подходы, состояние случайности бывает: «мягкое» (умеренное, симметричное), которое описывается гауссовым распределением или близким к нему; «медленное» (сильно асимметричное), для которого характерно логарифмически нормальное распределение или близкое к нему с моментами конечного порядка; «дикое» (необычное) типа гиперболических распределений Коши, Парето, Леви и др. [16].

Мягкое состояние случайности связано с простыми физическими явлениями и свойствами типа теории ошибок, теории идеального газа, броуновского движения, вибрации, кристаллизации и др. Медленное состояние случайности связано с соответствующим механизмом возникновения случайной величины с асимметричным распределением, например, изменение прочности, осадконакопление и метаморфизм осадочных горных пород. «Дикое» состояние случайности соотносится с механизмом образования фрактальных объектов с дробной размерностью [16, 23].

Хаос (греч. chaos) в греческой мифологии – беспредельная первобытная масса, из которой впоследствии образовалось все существующее, в переносном смысле слова – беспорядок, неразбериха [105].

Изучение литосферы как формы самоорганизации геологической среды, землетрясений, цунами, подводных течений, атмосферы и атмосферных явлений (циклонов, антициклонов, тайфунов, торнадо) привело к открытию детерминированного хаоса в динамических системах, что стало мировоззренческим переворотом, который позволил по-новому посмотреть на хорошо изученные системы [40, 157].

Суть открытия заключается в том, что детерминированная, полностью прогнозируемая система в некоторых случаях ведет себя хаотически, то есть непрогнозируемо. Впервые явление детерминированного хаоса было рассмотрено в работе американского ученого Е. Лоренца (1963 год), в частности, он описал

наблюдавшийся им в численных экспериментах по моделированию конвекции атмосферного воздуха аттрактор в трехмерном фазовом пространстве с разбегающимися в разные стороны фазовыми кривыми и указал на связь этого явления с турбулентностью [5, 157].

Понятие странного аттрактора также появилось в связи с работой Лоренца, а появление странного поведения системы (хаоса) при решении простого детерминистического дифференциального уравнения использовано Рюэлем и Такенсом для объяснения гидродинамической турбулентности [109, 162]. Такое хаотическое поведение наблюдалось Холмсом в совершенно простых механических системах, в частности при колебаниях в одной плоскости слегка выпученного стержня, на который действует синусоидальная боковая сила, возбуждаемая электромагнитом [109, 154]. Он исследовал физический и вычислительный смысл такого случайного поведения системы, а также провел специальные исследования магнитоупругой системы. Стержень можно моделировать системой с одной степенью свободы, но с сильно нелинейной потенциальной энергией, определяющей два близких по конфигурации, но противоположных по направлению положения потери устойчивости, поэтому на случайные колебания самого стержня асинхронно накладываются попеременные захваты двух закритических равновесных состояний.

Хаотические фазовые портреты странных аттракторов наблюдаются для чрезвычайно простых нелинейных динамических систем в трехмерном фазовом пространстве, например, в упругой сферической оболочке. Поэтому Ресслер образно, но весьма точно сказал: «Если колебание является типичным поведением двумерных динамических систем, то хаос точно так же характерен для трехмерных динамических систем». При этом хаос графически можно представить как *«бесконечное число неустойчивых периодических и несчетное количество непериодических повторяющихся траекторий»* [109, 160, 161].

Наличие динамического хаоса может оказывать значительное влияние на интерпретацию и понимание результатов численного интегрирования и методы их усреднения. Следует отметить, что это быстро развивающаяся область исследований. Хенон [109, 153] выполнил численное исследование странного аттрактора, который связан с разностным уравнением, моделирующим простое

отображение Пуанкаре для непрерывной системы, и установил, что в пространстве аттрактор состоит из ряда приблизительно параллельных кривых, а точки последовательных итераций, в конце концов, всюду плотно распределяются на этих кривых в почти случайном порядке в виде белого шума, организуя, по заключению Хенона, канторово множество [61, 109]. Он также установил чрезвычайную чувствительность странного аттрактора к начальным условиям (он доводил точность до шестнадцатизначного округления), однако независимо от этого постоянно и уверенно определялась как область существования аттрактора, так и траектории кривых. Отсюда следует вывод: *в то время как правильное положение точки решения теряется внутри притягивающихся кривых, положение самих кривых и характер их поведения достаточно точно определяется при помощи компьютерных вычислений* [109].

С другой стороны, странный аттрактор может возникнуть в самой вычислительной машине, если для решения и сходимости сложных задач используются многочисленные последовательные итерации. Например, в этой связи при решении статических задач теории упругости методом конечных элементов число итераций ограничивают значением 100 [112].

Различают хаотическое стохастическое (случайное) и детерминированное (ограниченное, определенное) движения [23]. Случайное движение – это движение, когда действующие на систему силы неизвестны, а известны только их статистические характеристики. Хаотическое детерминированное динамическое движение – это движение, в котором все же существует зависимость от начальных условий и *фазовая траектория системы возвращается в ограниченную область пространства*. Но при этом *весьма малая неточность в начальном состоянии системы обуславливает большую разницу между параметрами системы в ее конечном состоянии* [34, 109].

В этой связи при хаотических колебаниях теряется информация о начальном состоянии и предвидеть изначально дальнейшее поведение системы становится невозможно. Для такого движения *характерно наличие хаотического изменения периодов возвратов Пуанкаре, канторово подобие рассеивания траекторий в сечениях Пуанкаре, непрерывного спектра частот, расположенного ниже частоты бифуркации* [34, 61]. Решения детерминированных

уравнений будут хаотическими, если они расходятся экспоненциально и экспонента (экспонента Ляпунова) будет положительной [34].

Ранее были известны три вида динамического движения: равновесие, периодическое движение (границный цикл) и квазипериодическое движение. Эти состояния получили название аттракторов (притягателей), так как все переходные процессы со временем затухают и система «притягивается» к одному из перечисленных состояний. Хаотические колебания представляют новый класс движения, который связан с состоянием, называемым странным аттрактором. Классическим аттракторам отвечают классические геометрические «образы» в трехмерном фазовом пространстве: равновесному состоянию – точки, граничному циклу – замкнутые кривые, квазипериодическому движению – поверхности. Странный аттрактор, как оказалось, связан с таким геометрическим образом, как фрактал. Фрактал является удобным способом получения информации об объектах, для которых традиционный процесс измерения длин, площадей, объемов не дает полных результатов. Именно к таким объектам принадлежит, в частности, странный аттрактор. Хаотические явления в замкнутых диссипативных нелинейных системах подчиняются регулярным законам и за ними «стоит» не бесформенный хаос, а хаос со спрятанным порядком – *фрактальная структура* [34].

В геомеханических, технических и электродинамических системах возможно возникновение всего многообразия колебаний, в том числе параметрических, феррорезонансных и хаотических. Параметрический механизм колебаний возникает за счет того, что рабочее оборудование, системы охлаждения и другие компоненты постоянно, даже при проектных режимах работы, подвергаются вибрации со стороны вращающихся механизмов (турбины, генераторы, двигатели, насосы, дробилки, мельницы) и перекачиваемой рабочей среды. Особо следует подчеркнуть, что все эти механизмы имеют высокую добротность. Феррорезонансные колебания накладываются на параметрические и срывают их, затем на фоне феррорезонансных колебаний возникают субгармонические (комбинационные) и, наконец, хаотические [49, 126].

Область гармонических вынужденных колебаний возникает при низких напряжениях, затем возникают субгармонические колебания и

только при высоких напряжениях возникают хаотические неуправляемые колебания. В этом случае под высокими напряжениями как электрических сетей, так и механических конструкций следует понимать не просто их величину, а напряжения, при которых в электрической или механической системах возникают нелинейные эффекты за счет нелинейного изменения каких-либо характеристик системы, а именно, за счет магнитного насыщения, диссипации энергии или волн, гистерезисных или пластических свойств материала, разрушения материала и конструкций и так далее [16, 20, 49, 127]. Поэтому в нелинейных системах вид колебаний зависит не только от их частоты, но и от изменения как электрических, так и механических напряжений.

В горной механике под динамическим хаосом прежде всего понимают нерегулярное движение, вызванное нелинейностью среды [97, 125]. Например, в барабане мельницы наблюдается сдвиговая турбулентность пульпы, особенно на разделе фаз пульпа-футеровка, при этом динамический хаос может возникать в локальных областях сегмента загрузки [69, 92].

В этой области по-прежнему имеется целый ряд нерешенных вопросов, а также решенных, которые требуют принципиально новой трактовки происходящих процессов, например в электродинамике, по существу процесс излучения лазера является аттрактором, процессы включения и выключения лазера – странные аттракторы, а перенасыщение лазера (уровень накачки выше второго критического) приводит к интенсивным хаотическим динамическим пульсациям. Даже терминология градиентных динамических систем включает в себя такие термины, которые требуют или решения, или определения: «равновесие», «критическая точка», «невырожденная критическая точка (морсовская)», «вырожденная критическая точка», «структурная устойчивость», «структурная неустойчивость», «общая деформация», «фазовый портрет» [27].

## **1.2 Потеря устойчивости равновесных и автоколебательных режимов – исходные информативные параметры в «сценарии» хаотизации процессов**

В горных геотехнических системах, прежде всего, в силу специфики геологического строения породных массивов, высокой фрактальной размерности пород и полезных ископаемых,

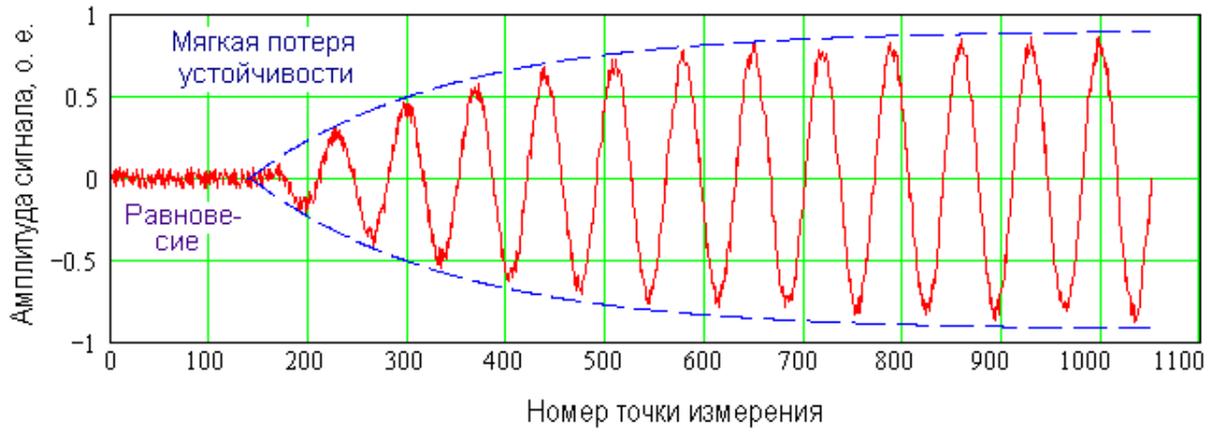
являющимися одновременно объектами, вмещающими шахты, рудники и подземные сооружения, и объектами добычи и переработки, возможно как самопроизвольное возникновение процессов самоорганизации, так и хаотических процессов. Эти процессы могут быть доминирующими или частичными, а в зависимости от положения равновесия – устойчивыми или неустойчивыми, потеря устойчивости может быть мягкой или жесткой [5, 19, 31, 53, 62, 77].

При мягкой потере устойчивости устанавливается *колебательный периодический режим*, который на начальном этапе мало чем отличается от состояния равновесия, рис. 1.1, а [5]. При жесткой потере устойчивости система скачком уходит из стационарного режима равновесия и переходит на другой режим движения, как правило, установившийся *колебательный периодический режим*, рис. 1.1, б. Режим, установившийся после потери устойчивости равновесного состояния, называется странным аттрактором (не равновесие и не предельный цикл). Такой режим означает, что в системе наблюдаются сложные непериодические колебания, для внешнего экспериментатора – *турбулентные*. Переход от устойчивого состояния равновесия к странному аттрактору может совершаться непосредственно сразу скачком при жесткой потере устойчивости (рис. 1.1, б), так и после возникновения мягкой потери устойчивости (рис. 1.1, а). Если хаотический режим не является необходимым технологическим режимом работы, то доводить динамическую систему до хаотического режима весьма опасно.

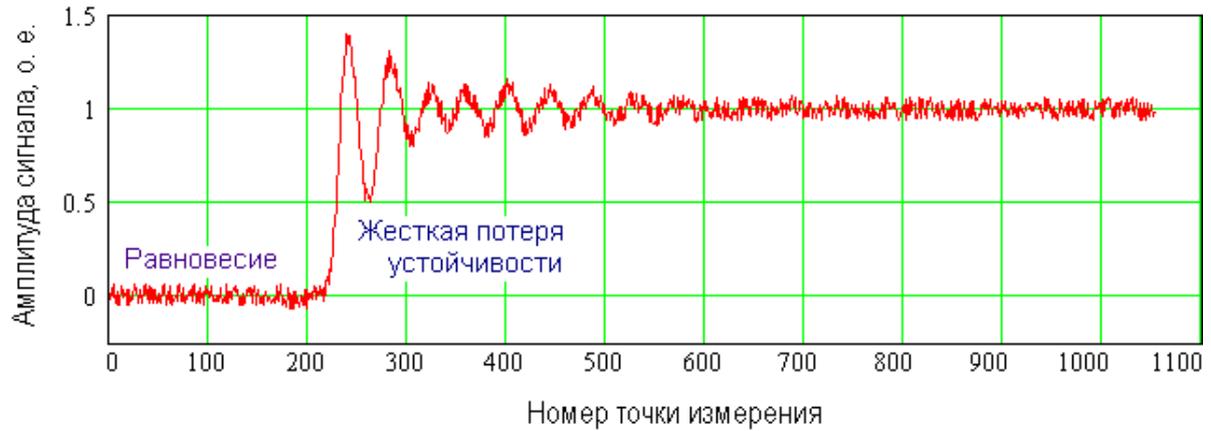
Известно, что в настоящее время в результате изучения перехода динамических систем к хаосу сложилось представление о трех типичных сценариях, а именно: через каскад удвоений периода (сценарий Фейгенбаума), для гидравлических систем через перемежаемости первого, второго и третьего типов и квазипериодические режимы [61].

Сценарий хаотизации колебательного процесса через удвоение периода приведен на рис. 1.1, в., при этом, потеря устойчивости цикла в однопараметрическом семействе систем возможна следующими способами: 1) столкновение с неустойчивым циклом; 2) удвоение; 3) рождение тора [5].

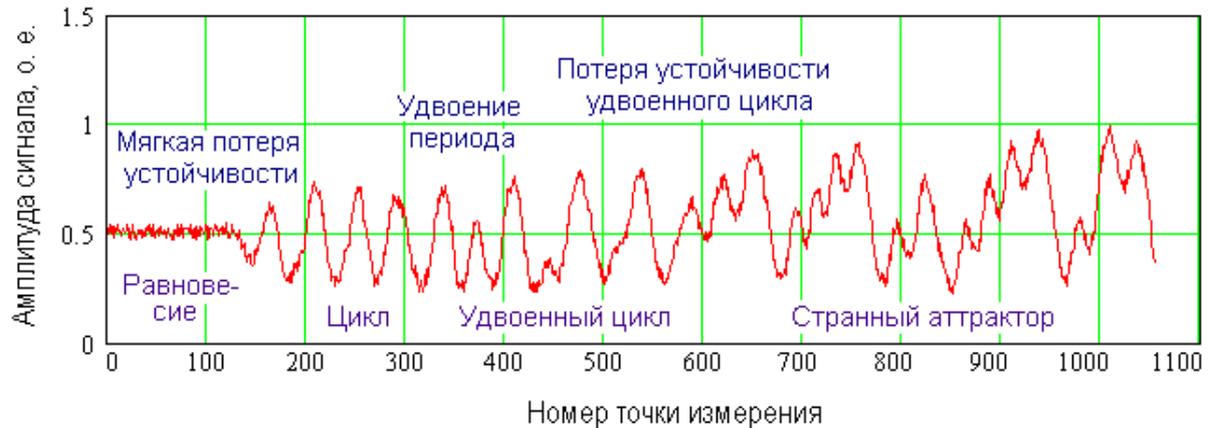
## ПОТЕРЯ УСТОЙЧИВОСТИ РАВНОВЕСНЫХ РЕЖИМОВ



а)



б)



в)

Рисунок 1.1 – Изменение динамического поведения системы: а) мягкая потеря устойчивости; б) жесткая потеря устойчивости; в) сценарий хаотизации

Размерность критического аттрактора, реализующегося в результате фейгенбаумовского каскада удвоений периода, всегда одна и та же и составляет  $1 + d$ , где  $d = 0,538\dots$  – универсальная константа (единица добавляется из-за дополнительного измерения вдоль фазовой траектории). Поперечная структура полос

представляет собой кантороподобное множество, фрактальные свойства которого те же, что и аттрактора Фейгенбаума, а старший ляпуновский показатель равен нулю [61].

Примером мягкой потери устойчивости в природе может служить образование циклонов при температурной конвекции воздуха, примером жесткой потери устойчивости могут служить землетрясения. В горных технических системах и электрических сетях, в особенности работающих на переменном токе и подверженных вибрационным воздействиям, колебаниям напряжений и изменению нагрузок, априори преобладает мягкая потеря устойчивости системы, однако возможная и жесткая потеря устойчивости в результате коротких электрических замыканий, механических разрушений конструкций, электрических пробоев и так далее.

Исходя из «сценария» хаотизации (рис. 1.1, в), наиболее простым и доступным способом диагностики мягкой потери устойчивости является анализ акустических и электрических сигналов, а информативными параметрами последовательно могут служить: развитие устойчивого предельного цикла (бифуркация Гопфа), удвоение периода (бифуркация Питчфорка), удвоенный цикл, потеря устойчивости удвоенного цикла, странный аттрактор, а также их спектры [5, 10, 34, 37, 60, 61, 146, 147]. Диагностика жесткой потери устойчивости (землетрясений, выбросов пород, угля и газа, обрушений кровли выработок) на финишном этапе практически не возможна, поэтому на практике обычно осуществляется предварительный прогноз с применением необходимых предупреждающих, но не всегда достаточных, мероприятий [26, 29, 81, 94, 135, 136].

Теория мягкой потери устойчивости равновесных состояний применима во всех областях науки (механике, электротехнике, физике, химии, биологии, экономике и так далее) как для колебательных систем с конечным числом степеней свободы, так и для мелкослоистых (шихтованные сердечники, статоры, роторы, якоря) диссипативных сред, в которых возбуждаются вынужденные колебания. Пример хаотических суммарных колебаний приведен на рис. 1.2 [49]. Обработка сигнала показала, что он действительно является хаотическим, так как четко наблюдается хаотичность возвратов Пуанкаре (кривая 4 на рис. 1.2).

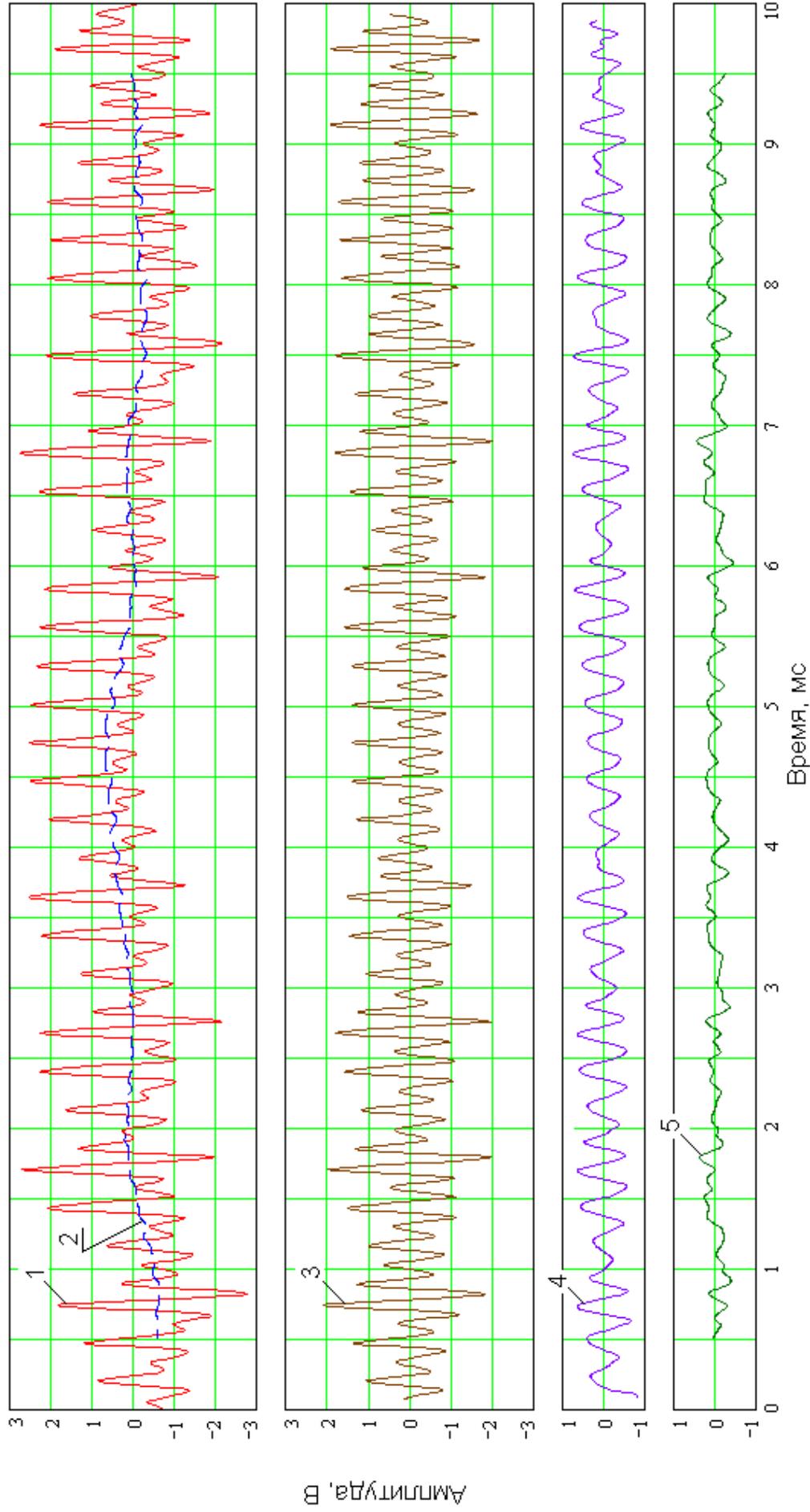


Рисунок 1.2 – Хаотические колебания в электрической модели энергетической установки: 1 – исходный сигнал; 2 – сигнал, усредненный по двумстам точкам; 3, 4, 5 – высокочастотная, среднечастотная и низкочастотная составляющие исходного сигнала, выделенные последовательным взаимным парным вычитанием исходного и сглаженных сигналов по 30-ти, 50-ти и двумстам точкам

---

Устойчивость и, соответственно, неустойчивость определяют по Лагранжу (траектория остается в замкнутой области), Пуассону (траектория многократно возвращается в  $\varepsilon$ -окрестность стартовой точки) и Ляпунову (две близкие на старте траектории остаются близкими всегда). *Если непериодическая траектория устойчива по Пуассону и Ляпунову, то она квазипериодическая. Критерием хаоса является наличие положительного старшего ляпуновского показателя.* Если старший показатель нулевой, то это может свидетельствовать о недостаточности анализа устойчивости по Ляпунову. Если все показатели отрицательны, то это говорит об асимптотической устойчивости траектории [61].

Эта работа направлена не на развитие теории катастроф, основы теории катастроф в ней использованы для обоснования информативных параметров прогнозирования процессов динамического хаоса в технических системах как при аварийных режимах работы, так и при заранее предусмотренных технологических режимах. Однако, для примера, следует остановиться на фактах, подтверждающих универсальность информативных параметров теории катастроф. Для этого нет необходимости доводить реальные или экспериментальные объекты до их катастрофического разрушения, достаточно выполнить анализ уже имеющегося в литературе фактического графического материала о мягкой или жесткой потере устойчивости с позиции теории катастроф при физическом ударном взаимодействии реальных тел, возникновении колебательных и волновых процессов в слоистых диссипативных средах.

Например, на рис. 1.3 [96] представлено изменение интенсивности рассеивания рентгеновского излучения на полислоях полимерных пленок, полученных методом послойного нанесения частичек.

При снижении угла рассеивания растет относительная интенсивность рентгеновских лучей и при этом увеличивается период их «шумовых» колебаний. Анализ результатов записи колебаний элементов различных транспортных средств при их динамическом нагружении под воздействием ударов, столкновений, технологических процессов погрузки-выгрузки также указывает на увеличение амплитуды и удвоение периода колебаний, хотя авторы работ и не обращают на это внимания [30, 96].

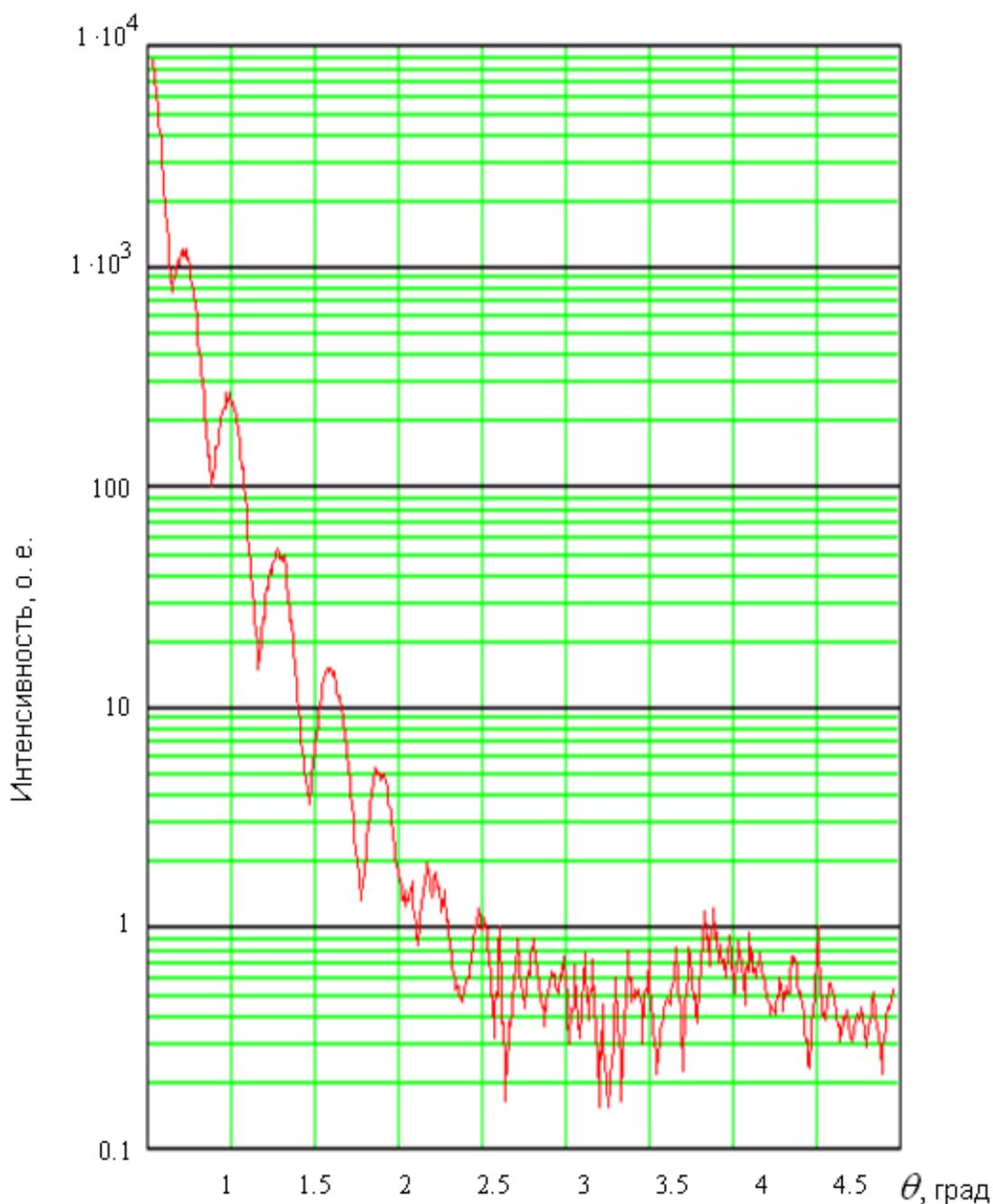


Рисунок 1.3 – Хаотическое изменение интенсивности малоуглового рассеивания рентгеновских лучей на полислоях частиц, полученных методом послойного нанесения (по материалам работы [96]).

Даже простой анализ чисто теоретических исследований распространения акустических волн в диссипативных нелинейных средах показывает на возможность формирования солитонов разной частоты, наличие дифракционных эффектов и неустойчивость волновых пакетов. Особо следует обратить внимание на резонансные процессы, которые происходят в блоковых и плоскопараллельных структурах, в различных резонаторах. В таких системах априори

---

образуются структуры разночастотных поперечных мод, частота которых определяется линейными размерами волноводов или резонаторов [20].

Хаотические процессы могут быть детерминированными или стохастическими. По существу, любые исходные физические переменные также делятся на два класса. В один класс входят известные характеристики, т.е. величины, которые поддаются (по крайней мере теоретически) точному измерению или определению. Они называются детерминированными переменными, которые часто, но отнюдь не всегда, описываются обычным математическим аппаратом. В другой класс входят неизвестные характеристики, т.е. величины, которые невозможно точно определить, поскольку имеют случайный характер. Они называются стохастическими переменными. Модель, содержащая стохастические переменные, по определению должна описываться математическим аппаратом теории вероятностей или математической статистики. Природа сложных физических процессов изначально чаще всего не известна, поэтому в принципе для исследователя такие процессы обычно характеризуются переменными обоих типов. В этой связи для построения адекватной математической модели весьма важно заранее определить природу исходных переменных [10, 18, 23, 37, 52, 70, 72, 75, 99]. Поскольку выполнить такое определение на практике весьма сложно, а иногда и невозможно, то отработать достоверные рабочие или информативные параметры лучше всего на математических моделях.

Как в математических, так особенно в физических приложениях, важной характеристикой вещественной функции, описывающей (моделирующей) реальный процесс, является наличие у нее «критических точек», в которых производная обращается в нуль. Наиболее характерные типы критических точек для непрерывных функций – это локальные максимумы и минимумы, но встречаются и более сложные точки – «точки перегиба», которые тоже подразделяются на различные типы [93, 109]. Морс дает определение «хорошим» критическим точкам (устойчивым) для любого числа переменных, распространив затем полученную классификацию на «вырожденные» критические точки (неустойчивые) для случая одной переменной. На основе теории Морса получена важная лемма о расщеплении, с помощью которой в принципе появляется

возможность существенно понижать число переменных в решаемых задачах. Морсовские критические точки обладают важным свойством устойчивости, которое интуитивно можно выразить словами *«сохранение типа при малых возмущениях»*. Эти точки обладают определенной окрестностью, в пределах которой изменение управления, – топологически (качественно), – не оказывает никакого эффекта, иными словами *«пока критические точки остаются морсовскими, бифуркации не возникают, а система локально качественно не изменяется»* [93]. Таким образом, чисто теоретически критерием перехода от регулярной, сложно организованной структуры к хаосу служит ее устойчивость по отношению к малым возмущениям.

### **1.3 Автоматизированные системы контроля параметров породного массива и технологических процессов горного производства**

В настоящее время во всем мире значительно усложнилась ситуация в горнодобывающей промышленности. Это связано с отработкой месторождений полезных ископаемых в сложных горно-геологических условиях, преимущественно на большой глубине, а также с ужесточением экологических требований природоохранных организаций [19, 152]. Например, в Великобритании добыча угля сокращается и в ближайшие годы предполагается закрыть больше половины работающих глубоких угольных шахт. В связи с этим крупнейшие угледобывающие компании прилагают огромные усилия на дальнейшую модернизацию производства: широко внедряется анкерное крепление, проводится комплексная автоматизация технологических процессов добычи и транспортировки угля, контроля состояния машин и механизмов, крепи и породного массива.

Модернизация и комплексная автоматизация горного производства необходима для повышения конкурентоспособности горнодобывающего предприятия и обеспечения требуемой безопасности труда. В этом можно убедиться на примере шахты *Cyrus Miami Mining* в Аризоне, США [152]. Выемка медной руды одновременно на шахте и карьере сопровождалась частыми обвалами, некоторые из которых содержали миллионы тонн породы. Причиной обвалов были структурные неоднородности массива, его

---

изменчивость. Внедрение автоматизированной системы контроля состояния породного массива, представляющей собой сеть компьютеров, лазерных теодолитов и экстензометров, позволило своевременно принимать эффективные меры по предупреждению обвалов.

Согласно статистическим данным [24], в угольной промышленности большинство несчастных случаев со смертельным исходом (около 74%) происходит в подземных выработках шахт. Это связано с обрушением пород, наличием газа и пыли, внезапными выбросами пород, угля и газа. Средняя глубина разработки угля за период с 1980 г. по 1989 г. возросла на 68 м, при этом условия работ еще более усложнились. Положение усугубляется тем, что в целом по отрасли около 80% шахт Украины имеют срок службы более 30 лет. Старение шахт приводит к увеличению протяженности горных выработок, которая составляет на сегодняшний день в среднем 53 км на одну шахту. Наиболее тяжелые условия разработки сложились в Донецком бассейне, где средняя глубина разработки составляет 664 м, причем каждая третья шахта эксплуатируется более 45 лет. Наиболее опасным производственным фактором являются обвалы и обрушения, которые явились причиной 32,5% несчастных случаев. В очистных забоях с обвалами и разрушениями связано более половины несчастных случаев – 55% (в струговых лавах – 62,5%), в забоях подготовительных выработок – 38,6%, в остальных действующих выработках – 8,7%.

В подготовительных выработках основными причинами травматизма являются нарушения конструкции крепи и технологии крепления, в частности незакладка пустот за крепью. Эти пустоты в дальнейшем способствуют деформации эксплуатируемых выработок и перераспределению нагрузок на конструкции крепи, их наличие стало причиной более 80% всех смертельных случаев от обрушений. Причиной обвалов и обрушений могут быть также не обнаруженные геологические нарушения пласта и вмещающих пород.

Отечественной промышленностью, как правило, выпускаются специализированные автоматизированные системы, предназначенные для решения конкретных технологических задач горного производства. К таким системам относятся, например, разработки института «Автоматуглепром» (НПО «Красный металлист», Украина): устройство группового контроля индикации температуры

УКИТ, комплекс телемеханики поверхности шахт ТПШ, система телемеханики объектов тупиковых выработок СТТВ, аппаратура дистанционного управления канатными дорогами АДУКД, стойка приема информации СПИ-1М, аппаратура автоматизации шахтных калориферных установок АКУ-3.1.1М, АКУ-3.2.1М. Каждая из этих систем предназначена для выполнения определенных функций, например: контроля порогового и индикации текущего значения температуры подшипников стационарных установок, масла в редукторах компрессоров, дробилок и других горных машин (УКИТ); приема непрерывных сигналов о содержании метана и дискретных сигналов о достижении предельно допустимой его объемной доли в местах установки анализаторов, регистрации величины и выдачи звуковой и световой сигнализации (СПИ-1М); автоматизации шахтных калориферных установок, использующих в качестве первичного теплоносителя пар или перегретую воду (АКУ-3.1.1М, АКУ-3.2.1М) и т.п. [31]. Основным недостатком специализированных систем является отсутствие их функциональной гибкости, что обуславливает трудности по перенастройке и наращиванию. Кроме того, известные системы выполнены на основе аналоговой элементной базы и цифровых схем малой степени интеграции, в связи с чем они имеют значительные габариты и массу [1, 2, 4, 77].

Для передачи информации чаще всего используются каналы связи шахтной телефонной сети, радиоканал, линии электро-снабжения или отдельный телефонный кабель [33, 35-38].

В настоящее время в развитии систем автоматизации наблюдаются следующие тенденции: быстрое освоение новых компьютерных технологий; повышение степени детализации систем сбора информации и управления; возрастание роли открытых систем; ориентация систем на прикладные области применения; использование персональной ЭВМ в качестве платформы для автоматизации.

Системы сбора и обработки информации на базе персональной ЭВМ – самый быстрорастущий сегмент в сфере автоматического мониторинга технологических процессов и управления ими. К преимуществам таких систем можно отнести наличие встроенных видеосредств, большой объем внутренней, внешней памяти и наработанного программного обеспечения, более широкие возможности операционных систем по сравнению с ОС программируемых логических контроллеров, наличие широкого

---

спектра средств разработки и систем автоматизированного проектирования, сетевые возможности. Возможность интеграции разноуровневых бизнес-систем, баз данных, систем делопроизводства и управления документооборотом предприятия непосредственно с системами мониторинга и управления технологическими процессами позволяет сократить затраты на оборудование на 45%. Применение персональной ЭВМ для автоматизированной системы дополняет ее архитектуру теми функциями, которые плохо реализуются программируемыми логическими контроллерами и микроконтроллерами [38]. К ним относятся встроенный эргономичный человеко-машинный интерфейс (HMI), сетевые возможности и доступ в Internet, управление сбором данных (SCADA), менеджмент и управление производством (MES), подготовка технической документации, производственной отчетности и статистический контроль (SPC).

При проектировании автоматизированной системы необходимо опираться на следующие принципы: мониторинга и управления в реальном времени с использованием операционной системы UNIX или Windows; открытости и совместимости с имеющимся программным обеспечением и аппаратными средствами ведущих мировых производителей через промышленные стандарты; масштабируемости и модульности в широком спектре приложений; интеграции в высокоуровневые бизнес-системы. Многоуровневость системы должна проявляться в ее программно-аппаратной структуре, а масштабируемость - в возможности ее поэтапного внедрения и наращивания от оперативного контроля до максимально автоматизированного контроля и управления. Использование в подсистеме нижнего уровня программируемых контроллеров позволяет обеспечить такие их преимущества, как возможность перепрограммирования под конкретные задачи измерений и управления, малое время начальной загрузки, большие длительности безотказной работы, наличие средств дискретного и аналогового ввода/вывода, сторожевых таймеров и др.

Современные персональные компьютеры обладают большой вычислительной мощностью и способны управлять большинством технологических процессов горного производства. Программное обеспечение для применения в горном деле должно включать базы исходных горно-геологических и горнотехнических данных,

программы расчета напряженно-деформированного состояния массива, планирования горных работ, транспорта, управления технологическими процессами и техническими средствами добычи полезных ископаемых [24, 31, 45, 54, 92, 132, 136]. Однако существующие программные продукты имеют ограничения, не позволяющие удовлетворить потребности горного дела вообще и контроля системы "крепь-породный массив" в частности. Что касается программного обеспечения для микроконтроллеров подсистемы нижнего уровня в приложении к горному делу, то оно либо вообще отсутствует, либо недоступно разработчикам в Украине. При этом программы на языках математического моделирования (Mathcad, Mathematica, MathLAB) с использованием их встроенных функций позволяют эффективно и быстро дополнить существующее программное обеспечение, что подтверждает доминирующую на рынке автоматизации концепцию построения систем на платформе IBM-совместимых персональных ЭВМ. Пакет математического моделирования Mathcad позволяет интегрировать функции, решать дифференциальные уравнения и их системы. Возможность работы с комплексными числами и матрицами, функции z-преобразования и преобразования Фурье особенно полезны для реализации алгоритмов цифровой обработки информации [12, 26, 35, 41-43, 44, 45, 47, 54, 75, 81, 91, 95, 108, 121].

Построение систем контроля и управления технологическими процессами на основе персональных ЭВМ стало возможным благодаря тому, что в последние годы значительно повысились надежность, точность, быстродействие и функциональные возможности устройств ввода/вывода и сопряжения [114, 116]. Обмен информацией между центральным процессором персональной ЭВМ и устройством ввода/вывода может быть осуществлен с помощью программного обеспечения на трех уровнях: нижнем уровне машинного программирования, уровне драйверов и уровне специализированных программных пакетов [41-43].

Одним из перспективных направлений автоматизации является создание управляющих экспертных систем – программ, основанных на человеческих экспертных знаниях, объем которых автоматически постоянно повышается благодаря анализу и накоплению информации об успешно выполненных заданиях. Такая система выдает пользователю возможные решения в критических ситуациях,

---

отделяет не связанные с данной конкретной ситуацией факторы, а среди оставшихся устанавливает связи и зависимости.

Современные системы автоматизации могут включать элементы нейронных сетей, обеспечивающие определенные преимущества в выполнении оценок, представлении характеристик и выводов. В результате синтеза элементов нейронных сетей и экспертных систем возможно создание эффективной автоматизированной системы, в которой нейронная сеть анализирует данные, а экспертная система выбирает некоторые дискретные решения, которые будут применены в конкретных ситуациях. Таким образом, в перспективе возможно создание полностью автоматической системы контроля и управления технологическими процессами горного производства.

К автоматизированным системам контроля и управления технологическими процессами предъявляются общие и специальные (обусловленные спецификой горного производства) требования: общие – высокое отношение «функциональные возможности/стоимость», надежность (безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость), гибкость (перестраиваемость, наращиваемость), метрологическая обеспеченность, соответствие действующим стандартам; специальные – взрывобезопасность, искробезопасность, пылевлагозащищенность и другие [3, 13, 29, 31, 33, 55, 56, 63, 77, 133].

Автоматизированные системы могут быть специализированными (предназначенными для решения конкретных задач горнотехнического производства) и универсальными (способными решать множество разнообразных задач) [1, 133]. Применение микропроцессорных средств в системах автоматизации контроля процессов горного производства позволяет осуществить принцип универсальности на основе разделения структуры системы на аппаратную и программную части. При этом перенастройка системы производится программно, а ее наращивание упрощается применением стандартизированных интерфейсов обмена информацией и предельной унификацией отдельных модулей.

Автоматизированные микропроцессорные системы могут быть децентрализованные и централизованные. Децентрализованные системы представляют собой сеть однотипных контроллеров, каждый из которых, как правило, обладает одинаковыми возможностями доступа к коммуникационным линиям обмена информацией по

горизонтали. Такие системы чаще всего имеют одноуровневую структуру. В настоящее время получила развитие теория децентрализованных систем управления технологическими процессами горного производства с использованием принципов коллективного управления. Разработаны и исследованы математические модели, алгоритмы и программное обеспечение. Для централизованных систем характерны иерархические многоуровневые системы, в которых центральная ЭВМ (объект нулевого ранга) непосредственно связан с рядом подчиненных ему контроллеров (объектов первого ранга), каждый из которых, в свою очередь может взаимодействовать с объектами второго ранга и т. д. В настоящее время все более широкое применение находят централизованные системы автоматизации процессов горного производства на основе IBM-совместимого центрального компьютера и сети удаленных контроллеров.

#### **1.4 Методы оперативного и автоматизированного контроля приконтурного массива горных пород в геомеханике**

По определению Н.В. Мельникова [106], не порода и не образец, а именно породный массив является основополагающим при решении инженерных вопросов геомеханики, поэтому всестороннее изучение массива – ее главная задача. В частности, весьма важны задачи обнаружения скрытых отслоений, расслоений и заколов для предупреждения обрушения горной массы, оценки нагруженности и устойчивости крепи выработок, тоннельных обделок, размеров заобделочных пустот и качества тампонажных работ, контроля металлических, деревянных, бетонных, набрызгбетонных крепей, свойств и состояния закрепного пространства и его взаимодействия с крепью [1, 3, 24, 25, 28-33, 73, 136].

Контроль массива основывается на знании физических процессов и осуществляется различными контрольно-измерительными средствами, выбор которых определяется свойствами пород и требованиями технологии добычи полезных ископаемых [5, 56]. При этом геофизические методы (в частности, сейсмоакустика) используются применительно к задачам управления кровлей, прогнозирования горных ударов и внезапных выбросов угля и газа [3, 24].

---

Большое внимание развитию методологии и аппаратуры акустического контроля уделяют в США, Великобритании, Германии, а также в: ИФЗ Российской АН, МГГУ, ИГФ НАН Украины, ИГТМ НАН Украины, УкрНИМИ и НГУ [3, 6, 22, 24, 25, 28, 29, 32, 33, 55, 63, 72, 73, 94, 98, 110, 127, 135, 136]. Основная тенденция развития технологии контроля направлена на автоматизацию получения, передачи, сбора и обработки информации [24]. Наиболее эффективными являются приборы активного дискретного и пассивного непрерывного контроля, средства измерений, которые могут работать со счетно-решающими устройствами, с устройствами с периодической самопроверкой и корректировкой точности [24, 33]. НПО «Нефтегеофизика» (Россия) для обработки материалов и массивов данных использует вычислительный комплекс ЭГВК. Центральным элементом комплекса является ЭВМ ПС-2000, представляющая собой мультипроцессорную систему, состоящую из мониторной подсистемы, мультипроцессора и субкомплекса внешней памяти. Программное обеспечение состоит из управляющей части и библиотеки прикладных программ. Обработке могут быть подвергнуты данные, зарегистрированные при взрывном, импульсном и вибрационном способах возбуждения колебаний. Для записи данных используется комплекс на основе регистрирующей станции «Прогресс-2» и источника возбуждения ГСК-6 либо ГСК-1П. Аналогичными по назначению, структуре и техническим данным являются цифровая регистрирующая система «Горизонт»; комплексы на базе цифровых регистраторов фирм EG&G Geometrics (США): Prakla-Seismos AG (Германия), Geophysical Enterprise (Болгария), станции интерпретации фирм Landmark Graphics Corp., DIAD Systems Ltd. (Англия) и др. Общими недостатками таких систем являются большие габариты и масса, необходимость использования мультипроцессоров и блоков внешней памяти, которая обусловлена малыми возможностями центральной ЭВМ. Среди портативной полевой аппаратуры наиболее известны малоканальные сейсмографы ES-125, ES-1210F, универсальные полевые измерители УПИ-2, УПИ-4, ЧИ-11 перечисленных фирм, а также портативные ЭВМ для полевых работ КТР-18, КТР-84 фирмы RAUTARUUKKI OY (Финляндия), спектроанализаторы Bruel & Kjer-2143 (Дания), SI 1220 фирмы Schlumberger Instruments (по материалам рекламных

проспектов фирм-разработчиков). Однако, применяемые ранее схемно-аппаратурные решения, отсутствие микропроцессорных средств и высокопроизводительных персональных ЭВМ с одной стороны затрудняли создание универсальной аппаратуры, а с другой – обуславливали низкий уровень автоматизации процесса контроля и управления [1, 4, 33].

Шахтный контроль выделился в отдельное направление [3, 6, 29, 33, 73, 74]. Для оценки удароопасности угольных пластов в шахтных условиях, а также для получения информации о напряженно-деформированном состоянии массива перед подготовительными выработками и в призабойном массиве применяются методы регистрации и счета импульсов акустической эмиссии [3]. С целью повышения избирательности используют несколько групп датчиков, разнесенных по массиву или сгруппированных в модули, что позволяет вести расчет координат очагов эмиссии [24, 33]. Для контроля процессов деформирования горного массива и выработок проводят измерение линейных перемещений пород и конструкций крепи [29, 98, 136]. При этом широко применяются электротензометрические датчики.

В основе алгоритмов обработки информации чаще всего лежат заранее определенные эмпирические и функциональные связи между устойчивостью выработок и измеряемыми параметрами [22, 72, 110]. При этом используются корреляционные зависимости между интенсивностью акустических импульсов, электромагнитного и рассеянного  $\gamma$ -излучения и напряжениями в массиве горных пород, между суммарной интенсивностью  $\beta$ - и  $\alpha$ -излучений и степенью выбросоопасности калийных руд. Работа акустических приборов основана на корреляционных связях, установленных между кинематическими и динамическими характеристиками упругих волн с одной стороны и физико-механическими свойствами горных пород с другой [3, 6, 24, 110].

### **1.5 Выводы по разделу**

Хотя выполненные теоретические и экспериментальные исследования проведены на достаточно высоком уровне, всесторонне и полно рассматривают суть математического моделирования технологических процессов и шахтного контроля, но практически все они обладают следующими недостатками: 1) не определены

---

рациональные методы, параметры и область их действия; 2) отсутствует критериальная база и ее взаимосвязь с одной стороны с горно-геологическими условиями отработки месторождения, а с другой – с конкретными параметрами технологических процессов проведения горных работ; 3) низкий уровень автоматизации контроля, моделирования и обработки результатов.

В аппаратном плане – для диагностики зачастую применяются приборы различного уровня, иногда даже без метрологического обеспечения, которые не предназначены для шахт и рудников и используются не по прямому назначению.

Появление и распространение широкой гаммы импортных высокопроизводительных однокристалльных микроконтроллеров общего назначения со встроенными аналого-цифровыми преобразователями, наличием режима пониженного энергопотребления и развитой системой команд позволяет решать многие задачи цифровой обработки сигналов без применения специализированных микросхем. Переносная аппаратура оперативного экспресс-контроля должна быть информативной, портативной, простой в эксплуатации и дешевой, что в целом повышает ее конкурентоспособность и производительность контроля. Задача оптимизации соотношения между аппаратными и программными компонентами системы для приборов оперативного контроля решается в пользу сокращения аппаратной части, что продиктовано стремлением уменьшить габариты и массу приборов, повысить их надежность при работе в полевых условиях.

Что касается методического обеспечения шахтного контроля, то в настоящее время практически отсутствуют утвержденные на уровне отрасли методики и руководства, в особенности для работы в шахтах, опасных по газу или пыли. Существующие средства контроля не соответствуют современным требованиям, так как не обеспечивают достаточной оперативности и информативности, а построение стационарной автоматизированной системы не всегда возможно и экономически целесообразно.

Поэтому необходимо выполнить идентификацию элементов геомеханических и геотехнических структур как объектов автоматического контроля технологических процессов проведения и поддержания горных выработок. Обосновать методы, выполнить математическое и компьютерное моделирование автоматической

---

цифровой обработки геофизических сигналов с учетом специфических особенностей реакции контролируемых геомеханических и геотехнических объектов на возмущающее воздействие. Определить параметры аналого-цифровых и микропроцессорных средств автоматизации контроля, обеспечивающих реализацию предложенных методов и алгоритмов. Разработать средства первичной автоматизации контроля: индикаторы, устройства, программы для однокристалльных микроконтроллеров приборов оперативного контроля и контроллеров нижнего уровня автоматизированной системы.

В настоящее время уже изучены сложные эффекты при колебаниях простых динамических систем: плоского физического маятника; стержней с одной и двумя степенями свободы; консольного шарнира; арок с симметричными и несимметричными деформациями при динамических скачках; самовозбуждающиеся колебания в трубах, по которым перекачивается жидкость, их статическая и динамическая неустойчивость [9, 34, 49, 61, 109, 126]. Известна гравитационная двухплечевая маятниковая система из кольца и стержня, соединенных подшипником, которая порождает прежде всего квазипериодические колебания, так как со слов авторов работы «дать формальное доказательство наличия признаков хаоса в системе они не могут – это довольно сложно» (курсовая работа Гладкова С.В., руководитель д.т.н., проф. Львов Г.И., «Компьютерное моделирование колебаний «Хаотического маятника», кафедра динамики и прочности машин инженерно-физического факультета НТУ «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2003). При этом, исходя из работы Владимирова С.Н. [21], даже техническая система из трех иррационально связанных частот не всегда порождает детерминированный хаос.

Задачи разработки новых математических моделей моделирования динамической системы «горный технический объект – породный массив» решается поэтапно, главные из которых следующие: идентификация элементов технического оборудования как объектов моделирования; обоснование информативных параметров реакции диагностируемых объектов на возбуждающее воздействие; определение параметров компьютерных средств моделирования, которые обеспечивают реализацию предложенных алгоритмов; анализ натурных исследований геомеханических систем на основе предложенных методов и средств моделирования.

## 2 ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

### 2.1 Компьютерное моделирование динамических процессов в технических системах на основе генераторов хаоса

Бурение шпуров и установка анкерных штанг при возведении анкерной или рамно-анкерной крепи на большинстве шахт осуществляется переносными пневматическими буровыми колонками. Мировой опыт свидетельствует, что среднее время бурения шпура и установка анкера составляет около 5 минут, что соответствует достигнутому в Украине показателям. Вместе с тем, на выполнение всех операций цикла крепления бригадой в составе 4 проходчиков затрачивается 30-35 минут, что в несколько раз меньше, чем время, достигнутое на шахтах Украины [15].

Бурение неоднородных слоистых горных пород характеризуется сложным вращательно-колебательным движением сосредоточенных и распределенных масс по криволинейным траекториям. При этом центры вращения могут совпадать с центрами масс и/или с осями шарнирных соединений либо находятся в пределах геометрического места точек, определяемого имеющимися степенями свободы и геометрическими размерами деталей соединяющихся механизмов, поэтому в общем случае центры вращения смещаются в процессе движения масс, описывая сложные траектории. Отработка технологии бурения, снижение устойчивости структур к случайным возмущениям приводит к необходимости учета особенностей хаотизации явлений и процессов. В настоящее время наиболее простой и доступный способ исследования динамических процессов в реальных механических системах возможен с помощью математического, компьютерного, а также натурного или полунатурного моделирования, вызывая возмущения в таких системах или их моделях генератором случайных чисел или генератором детерминированного хаоса.

Наиболее простым генератором случайных чисел для обычной электрической сети переменного тока может быть тумблер или рубильник, поскольку их включение или выключение при условии отсутствия специального контроля (синхронизации) заведомо случайно как по отношению к начальному электрическому

напряжению, так и его начальной фазе. Природа случайных переходных процессов в технических системах при включении и выключении потребителей электроэнергии исследована достаточно хорошо, они редко приводят к хаотизации процессов, поскольку являются естественным апробированным режимом работы.

Что же касается генераторов хаоса, то они доступны в Internet, но, как правило, не пригодны для научных исследований, поскольку обладают существенными недостатками: полное или частичное отсутствие всех необходимых параметров и неопределенность функций, что не позволяет проводить исследования как устойчивости самих генераторов, так и их влияния на устойчивость контролируемых систем.

В работе [119] с целью изучения явления динамического хаоса с помощью Mathcad [41, 42] апробированы генераторы хаоса, полученные на основе систем уравнений Лоренца (2.1) и Ресслера (2.2), отображений Хенона (2.3) и Икеды (2.4), функции Вейерштрасса – Мандельброта (2.5), уравнения Меки – Гласа (2.6), а также двухмерный (2.7) и трехмерный генераторы Ван дер Поля (2.8), генераторы на основе логистического отображения (2.9) и несимметричного TENT-отображения (2.10) [34, 61, 117].

Система уравнений Лоренца (Lorenz System):

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -\sigma(x - y), \\ \frac{dy}{dt} = x(r - z) - y, \\ \frac{dz}{dt} = xy - bz \end{cases}, \quad (2.1)$$

где динамика системы определяется параметрическими коэффициентами  $\sigma$ ,  $r$  и  $b$ :  $\sigma = 10$ ;  $r = 28$ ;  $b = 8/3$ .

Система уравнений Ресслера (Rossler System):

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -y - z, \\ \frac{dy}{dt} = x + ay, \\ \frac{dz}{dt} = b + xz - cz \end{cases}, \quad (2.2)$$

где параметрические коэффициенты:  $a = 0,2$ ;  $b = 0,2$ ;  $c = 5$ .

Отображение Хенона (Henon Map):

$$\begin{cases} x_{i+1} = 1 - ax_i^2 = by_i, \\ y_{i+1} = x_i \end{cases}, \quad (2.3)$$

где параметрические коэффициенты:  $a = 1,4$ ;  $b = 0,3$ .

Отображение Икеды (Ikeda Map):

$$\begin{cases} x_{i+1} = 1 + c(x_i \cos(\alpha_i) - y_i \sin(\alpha_i)), \\ y_{i+1} = c(x_i \sin(\alpha_i) + y_i \cos(\alpha_i)), \end{cases} \quad \text{где } \alpha_i = a - b/(1 + x_i + y_i), \quad (2.4)$$

где параметрические коэффициенты:  $a = 0,4$ ;  $b = 6$ ;  $c = 0,9$ .

Функция Вейерштрасса-Мандельброта (Weierstrass-Mandelbrot):

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} W(t) &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{1 - \cos b^m t}{b^{(2-D)m}}, \\ \operatorname{Im} W(t) &= - \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{\sin b^m t}{b^{(2-D)m}}, \end{aligned} \quad (2.5)$$

где параметрические коэффициенты:  $b = 1,5$ ;  $D = 1,5$ .

Уравнение Меки-Гласса (Makey-Glass):

$$x_{i+1} = x_i + \frac{bx_{i-\tau}}{1 + x_{i-\tau}^c} - ax_i, \quad (2.6)$$

где параметрические коэффициенты:  $a = 0,1$ ;  $b = 0,2$ ;  $c = 10$ ;  $\tau = 30$ .

Двухмерный генератор Ван дер Поля (Van der Pole 2D Generator):

$$\begin{cases} dx/dt = y, \\ dy/dt = a(1 - bx^2)y - x \end{cases}, \quad (2.7)$$

где параметрические коэффициенты:  $a = 1$ ;  $b = 0,3$ .

Трехмерный генератор Ван дер Поля (Van der Pole 3D Generator):

$$\begin{cases} dx/dt = y, \\ dy/dt = a(1 - bx^2)y - x + z, \\ dz/dt = B \sin(pt) \end{cases} \quad (2.8)$$

где параметрические коэффициенты:  $a = 1$ ;  $b = 0,3$ ;  $B = 1$ ;  $p = 1,5$ .

Генератор на основе логистического отображения:

$$x_{i+1} = \lambda x_i (1 - x_i). \quad (2.9)$$

Генератор на основе несимметричного TENT-отображения:

$$x_{i+1} = \begin{cases} 1 - \beta x_i, & x_i \geq 0, \\ 1 - \alpha x_i, & x_i < 0 \end{cases}. \quad (2.10)$$

При этом проведены исследования по оценке роли управляющих параметров на работу апробированных генераторов хаоса и их устойчивость. О принципиальной эффективности исследований и их применимости для изучения работы вращающихся частей машин (буровых ставов, пневмо- и электромоторов) и различных механизмов (турбин, насосов, двигателей) можно судить по рис. 2.1, на котором приведены результаты работы генератора хаоса на основе функции Вейерштрасса-Мандельброта (2.5). Даже из простого визуального анализа рисунка видно, что при определенных параметрических коэффициентах (близких к  $b = 1,5$ ;  $D = 1,5$ ) во вращающихся системах теоретически возможно возникновение динамического хаоса. Независимо от массы системы, положения оси системы и других конструктивных параметров это может привести к неравномерному износу механизма, например подшипников [69, 97]. Исследования генератора Лоренца положены в основу разработки микропроцессорного генератора Лоренца, предназначенного для имитации хаотических воздействий (раздел 3).

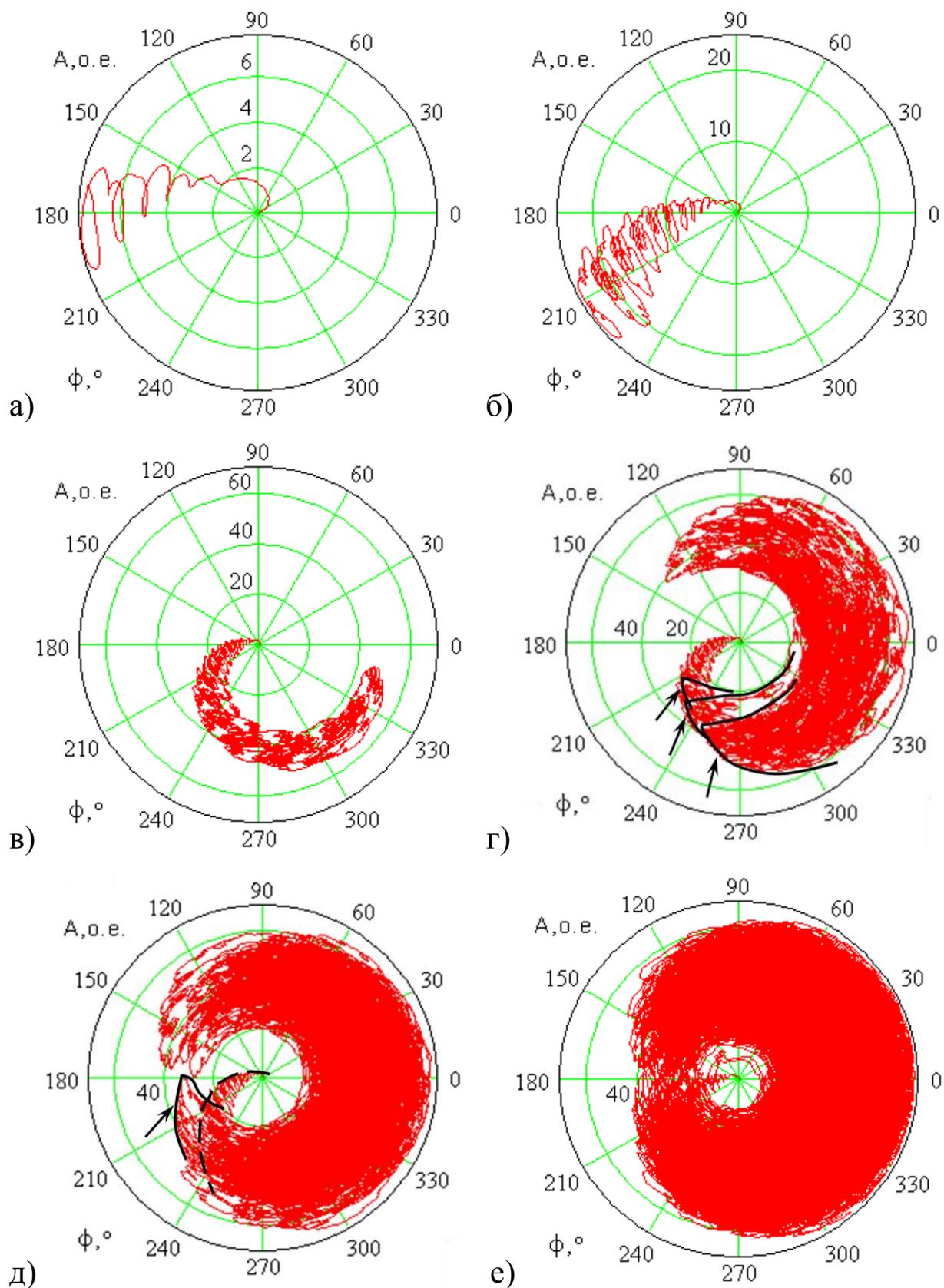


Рисунок 2.1 – Вихревой процесс, развивающийся в системе: а)  $h = 0,01, n = 10^2$ ; б)  $h = 0,01, n = 10^3$ ; в)  $h = 0,01, n = 10^4$ ; г)  $h = 0,01, n = 10^5$ ; д)  $h = 0,05, n = 10^5$ ; е)  $h = 0,1, n = 4 \cdot 10^5$

Составлена программа для автоматизированного определения клеточной размерности по фактическому материалу, который предварительно сканируется в компьютер для обработки. Поскольку считается, что функция Вейерштрасса-Мандельброта (2.5) имеет размерность  $D$ , которая аналогична фрактальной размерности и равна параметрическому коэффициенту  $D$  [34], то эти результаты использованы как тестовые для апробации программы и показали хорошую сходимость.

Бифуркации являются ключевым фактором пространственно-временной самоорганизации, они возникают, прежде всего, в открытых системах, в которые возможен приток внешней энергии. Такими системами априори являются горные машины, напряженные строительные конструкции и породные массивы. Неконтролируемый приток энергии, например, в результате проявлений горного давления, короткого замыкания может приводить к весьма тяжелым последствиям [129].

В общем виде для моделирования в натуральных условиях аттрактора системы, который характеризуется низкой воспроизводимостью, необходимо: определить максимально возможное число параметров хаотического процесса, чтобы они как минимум превышали число степеней свободы или фазовых изменений; выделить независимые переменные; реконструировать аттрактор путем построения корреляции между независимыми переменными [96].

Такой путь исследований весьма длительный, дорогостоящий, может привести к возникновению аварийной ситуации, поэтому принята иная концепция исследований, включающая: 1) разработку упрощенных математических моделей и изучение динамических процессов на моделях с помощью оболочки Mathcad с имитацией реальных параметров и реального режима времени; 2) изучение технических систем с различной степенью износа, но в нормальных режимах их работы и/или проведение измерений при повышенной, но допустимой нагрузке; 3) проведение измерений на реальных объектах или адекватных моделях, вызывая в них хаотические возмущения с помощью генератора детерминированного хаоса.

Для целей натурального моделирования в результате компьютерного моделирования отработаны исходные требования, а на кафедре электропривода Национального горного университета разработан, изготовлен и испытан переносной экспериментальный

---

генератор хаоса на основе микроконтроллера, программно реализующий хаотический процесс по системе уравнений Лоренца (см. раздел 3) [119].

Для определения влияния допустимых погрешностей итераций, порядка вычисления величин угловых ускорений эксцентрически смещенных масс внутри одной итерации выполнено методами аналитической механики математическое моделирование материальной системы, состоящей из трех связанных идеальных гравитационных маятников, причем дополнительно рассмотрен вариант, в котором первый маятник жестко соединен с маховиком. При этом сформулированы и определены параметры и критерии выбора допустимой погрешности итераций для математического моделирования динамических процессов в подобных технических системах. Математическое описание системы выполнено на основе известного подхода для двух связанных гравитационных маятников [17].

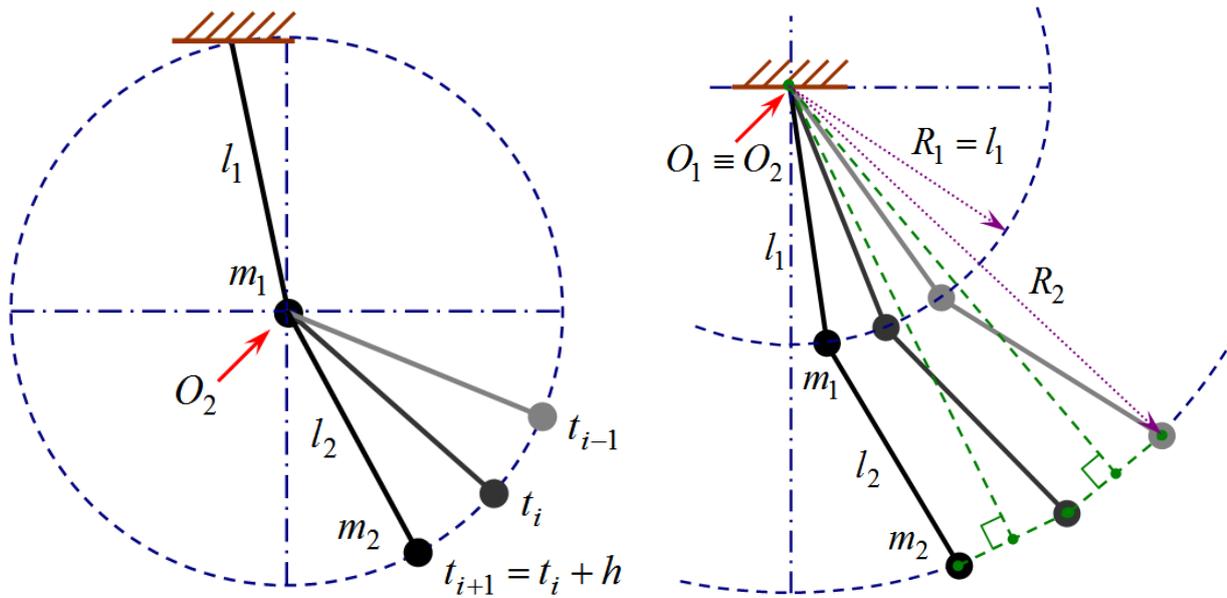
## **2.2 Определение особенностей математического моделирования динамических процессов на основе трех связанных гравитационных маятников с маховиком**

Моделирование динамических процессов в детерминированных системах, для которых возможны и характерны хаотические режимы, является достаточно сложной и настолько же неоднозначной задачей, насколько множественны варианты функционирования этих систем. Результаты моделирования часто критически чувствительны как к незначительным изменениям параметров систем, так и к выбору метода и шага численного интегрирования. Поэтому большое значение имеет алгоритм и реализованная точность вычислений. Рассмотрим механические системы, в которых имеются эксцентрически неуравновешенные массы, вращающиеся относительно смещающихся нефиксированных центров вращения (буровые ставы, маятниковые и рычажные механизмы, кулачковые и молоточковые механизмы, механизмы с рабочими органами-эксцентриками, роторные и ковшовые экскаваторы, погрузочные машины, горные комбайны, загрузка шаровых мельниц и мельниц принудительного самоизмельчения, раскачивающиеся грузы на упруго деформирующихся стрелах подъемных кранов и др.).

Например, движение загрузки в барабане мельницы формирует сложную иерархическую структуру с турбулентным движением пульпы и вихреобразным пульсирующим движением загрузки, а в целом процесс движения носит стохастический и нелинейный характер. Турбулентность как нерегулярное поведение нелинейной системы непосредственно связана с динамическим трехмерным хаосом и характеризуется сложным пространственно-временным поведением [97].

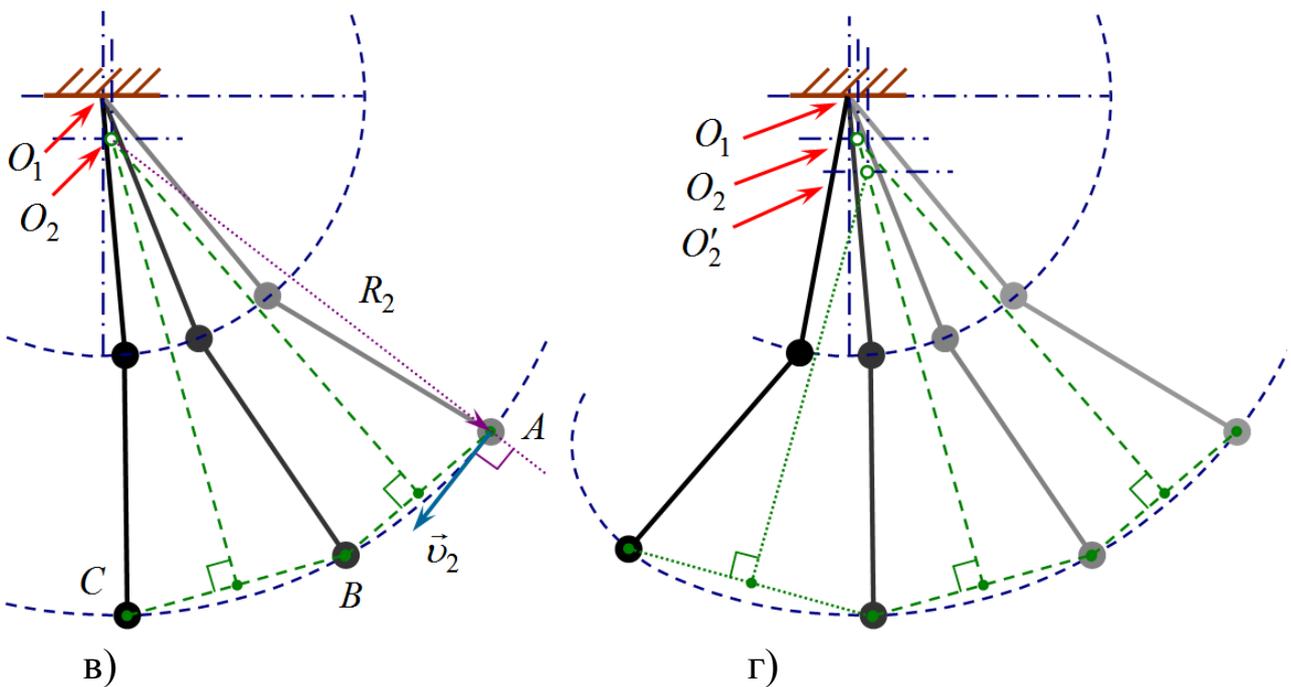
Достаточно часто при моделировании перечисленных выше механизмов и систем на основе уравнений динамики возникают ошибки, связанные с тем, что центр вращения определен неправильно, либо значительно смещается в пространстве за время одного шага интегрирования. Если эти системы проявляют себя как хаотические, то обнаружить ошибку, качественно анализируя графики переходных процессов, достаточно сложно.

Однако, рассчитав полную энергию такой системы на каждом шаге интегрирования, можно увидеть, что она изменяется даже в пределах временного интервала одного периода колебаний наиболее инерционного звена, что противоречит фундаментальному закону физики. Если координаты центров вращения определены неверно, то действующие на центры масс силы раскладываются на нормальные и тангенциальные составляющие вдоль ошибочных радиусов и касательных к траекториям. Неверно определенные тангенциальные составляющие сил дают ошибочные значения линейных тангенциальных (а, следовательно, и угловых) ускорений. Неверно определенные нормальные составляющие при жестких недеформируемых связях между массами дают ошибочную картину перераспределения сил, т. е. взаимного воздействия масс друг на друга. Так, на рис. 2.2 на примере плоской задачи для двухплечевой маятниковой системы показано, что в некоторых случаях центры вращения совпадают с центрами масс (а) или осями шарнирных соединений (б). Однако в общем случае центры вращения могут находиться в пределах геометрического места точек, определяемого имеющимися степенями свободы (в), и, смещаясь в процессе движения масс, описывать сложную траекторию (г). На рис. 2.2 (в) показано, что при шаге моделирования, стремящемся к нулю ( $h = \Delta t \rightarrow 0$ ), центр вращения массы  $m_2$  находится на пересечении высот треугольников  $AO_2B$  и  $BO_2C$ .



а)

б)



в)

г)

Рисунок 2.2 – Определение координат центров вращения масс системы маятников для случая плоской задачи: а) плечо 1 закреплено жестко, плечо 2 – шарнирно; б) плечо 1 закреплено шарнирно, плечо 2 – жестко; в) оба плеча соединены шарнирно, центр вращения  $O_2$  не совпадает ни с центром вращения  $O_1$ , ни с центром массы  $m_1$ ; г) центр вращения  $O_2$  смещается и в общем случае описывает сложную траекторию

В принятом приближении ( $h \rightarrow 0$ ) данные треугольники являются равнобедренными, и хорды  $AB$  и  $BC$  образуют окружность – элементарный участок траектории движения массы  $m_2$ . Таким образом, для того чтобы определить направление вектора мгновенной скорости  $\vec{v}_2$ , необходимо выполнить два шага моделирования, что требует предварительного разложения сил, приложенных к центру массы  $m_2$  на нормальную и тангенциальную составляющие (т. е. координаты центра вращения должны быть предварительно известны). В случае абсолютно жестких рычагов маятниковой системы моделирование, тем не менее, возможно выполнить методом итерационных приближений. *Критерием адекватности программной модели будем считать постоянство полной энергии замкнутой системы.*

Второй путь исследований – вывод выражений, описывающих кинематику системы. Для этого используем уравнения Лагранжа. Проф. Дж. М. Т. Томпсон указывал: «Уравнения Лагранжа продолжают играть в механике фундаментальную роль благодаря тому, что основанный на них подход является более общим, чем векторный подход Ньютона: они естественным образом привели... к представлению о минимуме общей потенциальной энергии... в состоянии устойчивого равновесия консервативной системы» [109].

Если материальная система обладает идеальными связями, то ее движение можно математически описать уравнениями Лагранжа второго рода, т. е. системой дифференциальных уравнений второго порядка:

$$Q_i = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial \alpha_i}, \quad (2.11)$$

где:  $Q_i$  – обобщенные силы;  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $T$  – кинетическая энергия системы;  $\dot{\alpha}_i$  – обобщенные скорости;  $\alpha_i$  – обобщенные координаты.

Обобщенные силы можно найти как коэффициенты при вариациях обобщенных координат в выражении для виртуальной работы:

$$\delta A = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot \delta \alpha_i = Q_1 \cdot \delta \alpha_1 + Q_2 \cdot \delta \alpha_2 + \dots + Q_n \cdot \delta \alpha_n. \quad (2.12)$$

Кинетическую энергию можно выразить через обобщенные скорости  $\dot{\alpha}_i$  и обобщенные координаты  $\alpha_i$ .

Рассмотрим материальную систему в виде тройного математического маятника (рис. 2.3), массы грузов которого равны:  $m_1, m_2, m_3$ ; длины плеч маятника равны:  $l_1, l_2, l_3$ ; обобщенные координаты равны:  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ .

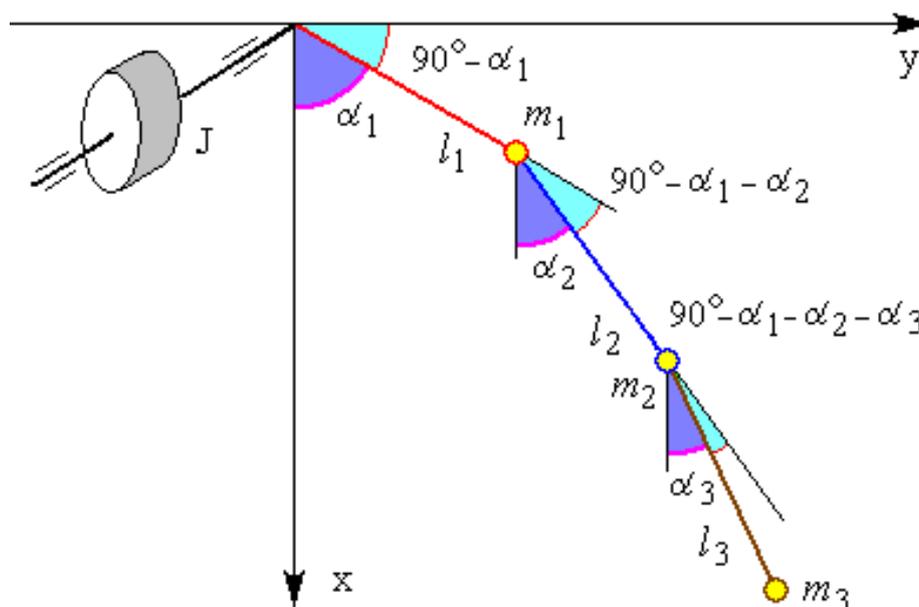


Рисунок 2.3 – Кинематическая расчетная схема системы

Координаты грузов определим по следующим формулам:

$$\begin{aligned} x_1 &= l_1 \cdot \cos \alpha_1, & y_1 &= l_1 \cdot \sin \alpha_1, \\ x_2 &= l_1 \cdot \cos \alpha_1 + l_2 \cdot \cos \alpha_2, & y_2 &= l_1 \cdot \sin \alpha_1 + l_2 \cdot \sin \alpha_2, \\ x_3 &= l_1 \cdot \cos \alpha_1 + l_2 \cdot \cos \alpha_2 + l_3 \cdot \cos \alpha_3, \\ y_3 &= l_1 \cdot \sin \alpha_1 + l_2 \cdot \sin \alpha_2 + l_3 \cdot \sin \alpha_3. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Кинетическую энергию системы определим по формуле:

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} m_1 \cdot v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \cdot v_2^2 + \frac{1}{2} m_3 \cdot v_3^2 = \frac{1}{2} m_1 \cdot (\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) + \frac{1}{2} m_2 \cdot (\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) + \\ &+ \frac{1}{2} m_3 \cdot (\dot{x}_3^2 + \dot{y}_3^2). \end{aligned} \quad (2.14)$$

Подставляя выражения производных:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= -l_1 \cdot \sin \alpha_1 \cdot \dot{\alpha}_1, & \dot{y}_1 &= l_1 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \dot{\alpha}_1, \\
 \dot{x}_2 &= -l_1 \cdot \sin \alpha_1 \cdot \dot{\alpha}_1 - l_2 \cdot \sin \alpha_2 \cdot \dot{\alpha}_2, & \dot{y}_2 &= l_1 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \dot{\alpha}_1 + l_2 \cdot \cos \alpha_2 \cdot \dot{\alpha}_2, \\
 \dot{x}_3 &= -l_1 \cdot \sin \alpha_1 \cdot \dot{\alpha}_1 - l_2 \cdot \sin \alpha_2 \cdot \dot{\alpha}_2 - l_3 \cdot \sin \alpha_3 \cdot \dot{\alpha}_3, & & (2.15) \\
 \dot{y}_3 &= l_1 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \dot{\alpha}_1 + l_2 \cdot \cos \alpha_2 \cdot \dot{\alpha}_2 + l_3 \cdot \cos \alpha_3 \cdot \dot{\alpha}_3,
 \end{aligned}$$

получим:

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{1}{2}(m_1 + m_2 + m_3) \cdot l_1^2 \cdot \dot{\alpha}_1^2 + \frac{1}{2}(m_2 + m_3) \cdot l_2^2 \cdot \dot{\alpha}_2^2 + \frac{1}{2}m_3 \cdot l_3^2 \cdot \dot{\alpha}_3^2 + \\
 &+ (m_2 + m_3) \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \dot{\alpha}_1 \cdot \dot{\alpha}_2 \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + m_3 \cdot l_1 \cdot l_3 \cdot \dot{\alpha}_1 \cdot \dot{\alpha}_3 \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha_3) + \\
 &+ m_3 \cdot l_2 \cdot l_3 \cdot \dot{\alpha}_2 \cdot \dot{\alpha}_3 \cdot \cos(\alpha_2 - \alpha_3). \quad (2.16)
 \end{aligned}$$

Таким образом, из полученной формулы (2.16) следует, что кинетическая энергия есть функция обобщенных координат и обобщенных скоростей. Частные производные кинетической энергии материальной системы равны:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}_1} &= (m_1 + m_2 + m_3) \cdot l_1^2 \cdot \dot{\alpha}_1 + (m_2 + m_3) \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \dot{\alpha}_2 \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + \\
 &+ m_3 \cdot l_1 \cdot l_3 \cdot \dot{\alpha}_3 \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha_3), \\
 \frac{\partial T}{\partial \alpha_1} &= -(m_2 + m_3) \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \dot{\alpha}_1 \cdot \dot{\alpha}_2 \cdot \sin(\alpha_1 - \alpha_2) - m_3 \cdot l_1 \cdot l_3 \cdot \dot{\alpha}_1 \cdot \dot{\alpha}_3 \cdot \sin(\alpha_1 - \alpha_3), \\
 \frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}_2} &= (m_2 + m_3) \cdot l_2^2 \cdot \dot{\alpha}_2 + (m_2 + m_3) \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \dot{\alpha}_1 \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + \\
 &+ m_3 \cdot l_2 \cdot l_3 \cdot \dot{\alpha}_3 \cdot \cos(\alpha_2 - \alpha_3), \quad (2.17) \\
 \frac{\partial T}{\partial \alpha_2} &= (m_2 + m_3) \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \dot{\alpha}_1 \cdot \dot{\alpha}_2 \cdot \sin(\alpha_1 - \alpha_2) - m_3 \cdot l_2 \cdot l_3 \cdot \dot{\alpha}_2 \cdot \dot{\alpha}_3 \cdot \sin(\alpha_2 - \alpha_3), \\
 \frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}_3} &= m_3 \cdot l_3^2 \cdot \dot{\alpha}_3 + m_3 \cdot l_1 \cdot l_3 \cdot \dot{\alpha}_1 \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha_3) + m_3 \cdot l_2 \cdot l_3 \cdot \dot{\alpha}_2 \cdot \cos(\alpha_2 - \alpha_3), \\
 \frac{\partial T}{\partial \alpha_3} &= m_3 \cdot l_1 \cdot l_3 \cdot \dot{\alpha}_1 \cdot \dot{\alpha}_3 \cdot \sin(\alpha_1 - \alpha_3) + m_3 \cdot l_2 \cdot l_3 \cdot \dot{\alpha}_2 \cdot \dot{\alpha}_3 \cdot \sin(\alpha_2 - \alpha_3).
 \end{aligned}$$

Виртуальная работа равна:

$$\delta A = m_1 \cdot g \cdot \delta x_1 + m_2 \cdot g \cdot \delta x_2 + m_3 \cdot g \cdot \delta x_3. \quad (2.18)$$

Подставляя:

$$\begin{aligned}\delta x_1 &= -l_1 \cdot \sin \alpha_1 \cdot \delta \alpha_1, \\ \delta x_2 &= -l_1 \cdot \sin \alpha_1 \cdot \delta \alpha_1 - l_2 \cdot \sin \alpha_2 \cdot \delta \alpha_2, \\ \delta x_3 &= -l_1 \cdot \sin \alpha_1 \cdot \delta \alpha_1 - l_2 \cdot \sin \alpha_2 \cdot \delta \alpha_2 - l_3 \cdot \sin \alpha_3 \cdot \delta \alpha_3,\end{aligned}\quad (2.19)$$

получим окончательное выражение для виртуальной работы (2.20), откуда найдем обобщенные силы (2.21) как коэффициенты при вариациях обобщенных координат:

$$\delta A = -(m_1 + m_2 + m_3) \cdot g \cdot l_1 \cdot \sin \alpha_1 \cdot \delta \alpha_1 - (m_2 + m_3) \cdot g \cdot l_2 \cdot \sin \alpha_2 \cdot \delta \alpha_2 - m_3 \cdot g \cdot l_3 \cdot \sin \alpha_3 \cdot \delta \alpha_3; \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned}Q_1 &= -(m_1 + m_2 + m_3) \cdot g \cdot l_1 \cdot \sin \alpha_1, \\ Q_2 &= -(m_2 + m_3) \cdot g \cdot l_2 \cdot \sin \alpha_2, \\ Q_3 &= -m_3 \cdot g \cdot l_3 \cdot \sin \alpha_3.\end{aligned}\quad (2.21)$$

Распишем уравнения Лагранжа второго рода (2.11) – уравнения движения данной материальной системы в координатах:

$$Q_1 = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial \alpha_1}; \quad Q_2 = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}_2} \right) - \frac{\partial T}{\partial \alpha_2}; \quad Q_3 = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}_3} \right) - \frac{\partial T}{\partial \alpha_3} \quad (2.22)$$

Подставив обобщенные силы, частные производные кинетической энергии системы и выполнив некоторые математические операции, получим окончательные уравнения движения материальной системы:

$$\begin{aligned}- (m_1 + m_2 + m_3) \cdot g \cdot l_1 \cdot \sin \alpha_1 &= (m_1 + m_2 + m_3) \cdot l_1^2 \cdot \ddot{\alpha}_1 + \\ &+ (m_2 + m_3) \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \ddot{\alpha}_2 + m_3 \cdot l_1 \cdot l_3 \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha_3) \cdot \ddot{\alpha}_3 + \\ &+ (m_2 + m_3) \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \sin(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \dot{\alpha}_2^2 + m_3 \cdot l_1 \cdot l_3 \cdot \sin(\alpha_1 - \alpha_3) \cdot \dot{\alpha}_3^2; \\ - (m_2 + m_3) \cdot g \cdot l_2 \cdot \sin \alpha_2 &= (m_2 + m_3) \cdot l_2^2 \cdot \ddot{\alpha}_2 + (m_2 + m_3) \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \ddot{\alpha}_1 + \\ &+ m_3 \cdot l_2 \cdot l_3 \cdot \cos(\alpha_2 - \alpha_3) \cdot \ddot{\alpha}_3 - (m_2 + m_3) \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \sin(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \dot{\alpha}_1^2 + \\ &+ m_3 \cdot l_2 \cdot l_3 \cdot \sin(\alpha_2 - \alpha_3) \cdot \dot{\alpha}_3^2;\end{aligned}\quad (2.23)$$

$$\begin{aligned}
 -m_3 \cdot g \cdot l_3 \cdot \sin \alpha_3 &= m_3 \cdot l_3^2 \cdot \ddot{\alpha}_3 + m_3 \cdot l_1 \cdot l_3 \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha_3) \cdot \ddot{\alpha}_1 + \\
 + m_3 \cdot l_2 \cdot l_3 \cdot \cos(\alpha_2 - \alpha_3) \cdot \ddot{\alpha}_2 - m_3 \cdot l_1 \cdot l_3 \cdot \sin(\alpha_1 - \alpha_3) \cdot \dot{\alpha}_1^2 - \\
 - m_3 \cdot l_2 \cdot l_3 \cdot \sin(\alpha_2 - \alpha_3) \cdot \dot{\alpha}_2^2.
 \end{aligned}$$

Добавим к оси вращения первого маятника маховик массой  $m_m$ , радиусом  $R$  (рис. 2.3). Момент инерции условного маховика может быть равен суммарному моменту инерции ротора или якоря электродвигателя и вращающихся частей зубчатой передачи, приведенному к валу (оси вращения) первого плеча маятника. Теперь к кинетической энергии материальной системы добавится кинетическая энергия вращения маховика  $T_m$ , и формула для ее определения примет вид:

$$T = T_1 + T_2 + T_3 + T_m, \quad (2.24)$$

где:  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  – кинетические энергии соответственно первого, второго и третьего маятников;

$$T_m = \frac{1}{2} J \cdot \omega_1^2 = \frac{1}{2} J \cdot \dot{\alpha}_1^2, \quad (2.25)$$

где:  $J$  – момент инерции маховика,  $\omega_1$  – угловая скорость вращения маховика и первого маятника, так как они находятся на одной оси вращения;

$$T = \frac{1}{2} m_1 \cdot v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \cdot v_2^2 + \frac{1}{2} m_3 \cdot v_3^2 + \frac{1}{2} J \cdot \dot{\alpha}_1^2. \quad (2.26)$$

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{1}{2} (m_1 + m_2 + m_3) \cdot l_1^2 \cdot \dot{\alpha}_1^2 + \frac{1}{2} (m_2 + m_3) \cdot l_2^2 \cdot \dot{\alpha}_2^2 + \frac{1}{2} m_3 \cdot l_3^2 \cdot \dot{\alpha}_3^2 + \\
 &+ (m_2 + m_3) \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \dot{\alpha}_1 \cdot \dot{\alpha}_2 \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + m_3 \cdot l_1 \cdot l_3 \cdot \dot{\alpha}_1 \cdot \dot{\alpha}_3 \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha_3) + \\
 &+ m_3 \cdot l_2 \cdot l_3 \cdot \dot{\alpha}_2 \cdot \dot{\alpha}_3 \cdot \cos(\alpha_2 - \alpha_3) + \frac{1}{2} J \cdot \dot{\alpha}_1^2.
 \end{aligned} \quad (2.27)$$

Частные производные кинетической энергии материальной системы равны:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}_1} &= (m_1 + m_2 + m_3) \cdot l_1^2 \cdot \dot{\alpha}_1 + (m_2 + m_3) \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \dot{\alpha}_2 \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + \\
 &+ m_3 \cdot l_1 \cdot l_3 \cdot \dot{\alpha}_3 \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha_3) + J \cdot \dot{\alpha}_1,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial T}{\partial \alpha_1} &= -(m_2 + m_3) \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \dot{\alpha}_1 \cdot \dot{\alpha}_2 \cdot \sin(\alpha_1 - \alpha_2) - m_3 \cdot l_1 \cdot l_3 \cdot \dot{\alpha}_1 \cdot \dot{\alpha}_3 \cdot \sin(\alpha_1 - \alpha_3), \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}_2} &= (m_2 + m_3) \cdot l_2^2 \cdot \dot{\alpha}_2 + (m_2 + m_3) \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \dot{\alpha}_1 \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + \\ &\quad + m_3 \cdot l_2 \cdot l_3 \cdot \dot{\alpha}_3 \cdot \cos(\alpha_2 - \alpha_3),\end{aligned}\quad (2.28)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \alpha_2} = (m_2 + m_3) \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \dot{\alpha}_1 \cdot \dot{\alpha}_2 \cdot \sin(\alpha_1 - \alpha_2) - m_3 \cdot l_2 \cdot l_3 \cdot \dot{\alpha}_2 \cdot \dot{\alpha}_3 \cdot \sin(\alpha_2 - \alpha_3),$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}_3} = m_3 \cdot l_3^2 \cdot \dot{\alpha}_3 + m_3 \cdot l_1 \cdot l_3 \cdot \dot{\alpha}_1 \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha_3) + m_3 \cdot l_2 \cdot l_3 \cdot \dot{\alpha}_2 \cdot \cos(\alpha_2 - \alpha_3),$$

$$\frac{\partial T}{\partial \alpha_3} = m_3 \cdot l_1 \cdot l_3 \cdot \dot{\alpha}_1 \cdot \dot{\alpha}_3 \cdot \sin(\alpha_1 - \alpha_3) + m_3 \cdot l_2 \cdot l_3 \cdot \dot{\alpha}_2 \cdot \dot{\alpha}_3 \cdot \sin(\alpha_2 - \alpha_3).$$

Виртуальная работа равна:

$$\delta A = m_1 \cdot g \cdot \delta x_1 + m_2 \cdot g \cdot \delta x_2 + m_3 \cdot g \cdot \delta x_3 + m_M \cdot g \cdot \delta x_M, \quad (2.29)$$

т. к.  $\delta x_M = 0$ , то

$$\begin{aligned}\delta A &= -(m_1 + m_2 + m_3) \cdot g \cdot l_1 \cdot \sin \alpha_1 \cdot \delta \alpha_1 - (m_2 + m_3) \cdot g \cdot l_2 \cdot \sin \alpha_2 \cdot \delta \alpha_2 - \\ &\quad - m_3 \cdot g \cdot l_3 \cdot \sin \alpha_3 \cdot \delta \alpha_3.\end{aligned}$$

Обобщенные силы, как и в случае отсутствия маховика, равны (2.21).

Уравнения Лагранжа второго рода для рассматриваемой материальной системы имеют вид:

$$\begin{aligned}-(m_1 + m_2 + m_3) \cdot g \cdot l_1 \cdot \sin \alpha_1 &= \left( (m_1 + m_2 + m_3) \cdot l_1^2 + J \right) \cdot \ddot{\alpha}_1 + \\ &+ (m_2 + m_3) \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \ddot{\alpha}_2 + m_3 \cdot l_1 \cdot l_3 \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha_3) \cdot \ddot{\alpha}_3 + \\ &+ (m_2 + m_3) \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \sin(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \dot{\alpha}_2^2 + m_3 \cdot l_1 \cdot l_3 \cdot \sin(\alpha_1 - \alpha_3) \cdot \dot{\alpha}_3^2; \\ -(m_2 + m_3) \cdot g \cdot l_2 \cdot \sin \alpha_2 &= (m_2 + m_3) \cdot l_2^2 \cdot \ddot{\alpha}_2 + (m_2 + m_3) \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \ddot{\alpha}_1 + \\ &+ m_3 \cdot l_2 \cdot l_3 \cdot \cos(\alpha_2 - \alpha_3) \cdot \ddot{\alpha}_3 - (m_2 + m_3) \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \sin(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \dot{\alpha}_1^2 + \\ &\quad + m_3 \cdot l_2 \cdot l_3 \cdot \sin(\alpha_2 - \alpha_3) \cdot \dot{\alpha}_3^2; \quad (2.30) \\ -m_3 \cdot g \cdot l_3 \cdot \sin \alpha_3 &= m_3 \cdot l_3^2 \cdot \ddot{\alpha}_3 + m_3 \cdot l_1 \cdot l_3 \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha_3) \cdot \ddot{\alpha}_1 + \\ &+ m_3 \cdot l_2 \cdot l_3 \cdot \cos(\alpha_2 - \alpha_3) \cdot \ddot{\alpha}_2 - m_3 \cdot l_1 \cdot l_3 \cdot \sin(\alpha_1 - \alpha_3) \cdot \dot{\alpha}_1^2 - \\ &\quad - m_3 \cdot l_2 \cdot l_3 \cdot \sin(\alpha_2 - \alpha_3) \cdot \dot{\alpha}_2^2.\end{aligned}$$

Угловые ускорения маятников являются взаимозависимыми величинами, поэтому для их определения используем метод итерационных приближений. Анализ полученных нами формул и известных выражений для двухмассовой маятниковой системы [17] показывает, что в общем случае угловое ускорение каждого маятника определяется следующими составляющими: слагаемым, включающим конструктивные параметры системы; слагаемыми числом  $n-1$ , включающими в качестве сомножителя квадраты угловых скоростей остальных маятников; и, наконец, слагаемыми числом  $n-1$ , включающими в качестве сомножителя угловые ускорения остальных маятников (где  $n$  – количество маятников). При определении угловых ускорений на каждом шаге моделирования предложена следующая последовательность вычислений:

– определение угловых ускорений каждого из маятников с учетом всех составляющих, не зависящих от угловых ускорений остальных маятников (начальный шаг);

– последовательное уточнение угловых ускорений каждого из маятников методом итерационных приближений с учетом всех составляющих; в слагаемые, зависящие от угловых ускорений остальных маятников, подставляем значения, полученные на начальном шаге, а затем – значения, полученные на предыдущей итерации.

Очевидно, что для систем, используемых в технических приложениях, т. е. для систем с конечными массами и ограниченными геометрическими размерами, а также для упрощенных адекватных моделей таких систем сходимость итерационных вычислений обеспечивается в любом случае. Однако важным является вопрос выбора допустимой погрешности итераций и порядка вычислений величин угловых ускорений внутри одной итерации. Если изменить установленный порядок, то полученные значения угловых ускорений также изменяются, хотя и на меньшую величину, чем допустимая погрешность итераций. Тем не менее, эти незначительные изменения могут оказаться существенными с точки зрения определения текущих координат центров масс в конкретный момент времени, поскольку системы динамического хаоса являются весьма чувствительными к начальным условиям. Известный физик-релятивист К. Ланцош утверждал: «Аналитическая механика представляет собой много больше, чем эффективный инструмент для решения динамических проблем, встречающихся в физике и технике.

---

Вряд ли существует другая такая математическая наука, в которой строгая абстрактная модель и экспериментальные данные столь хорошо согласуются и поддерживают друг друга» [64]. Однако, ныне известно, что для детерминированных систем, в которых наблюдается динамический хаос, сколь угодно малые изменения начальных условий приводят со временем к значительным отклонениям траектории, в связи с чем определение координат системы математическим моделированием в заданный момент времени невозможно, даже если имеется только лишь единственное решение при данных начальных условиях.

При использовании численных методов для решения дифференциальных уравнений координаты системы в момент времени  $t_{i+1}$  определяются на основе их значений в момент времени  $t_i$ , являющихся, по сути, начальными условиями. На каждом шаге интегрирования происходит возмущение начальных условий, обусловленное ошибкой интегрирования. Поэтому очевидно, что изменение допустимой погрешности итераций и порядка вычислений величин угловых ускорений внутри одной итерации при определении угловых ускорений эксцентрически смещенных масс также существенно влияет на полученные траектории (а не только изменение шага интегрирования по времени).

Как было отмечено, критерием адекватности модели можно считать постоянство полной энергии замкнутой системы. Выполнено моделирование трехмассовой системы маятников при различных значениях шага интегрирования и допустимой погрешности итераций (рис. 2.4, табл. 2.1). Во всех случаях общая энергия системы растет практически линейно во времени крайне медленными темпами (менее 3 десятитысячных долей процента на один шаг интегрирования). Незначительный рост значения полной энергии объясняется погрешностью численного интегрирования, однако на протяжении десятков циклов даже самых низкочастотных колебаний энергия системы практически не изменяется, что говорит об адекватности модели.

Тем не менее, анализируя рис. 2.4 и табл. 2.1 можно заметить, что при одном и том же значении шага интегрирования по времени уменьшение допустимой погрешности итераций с 0,1 о. е. до 0,01 о. е. приводит к существенному выполаживанию графика потенциальной энергии (пары графиков 1-2 и 5-6 на рис. 2.4).

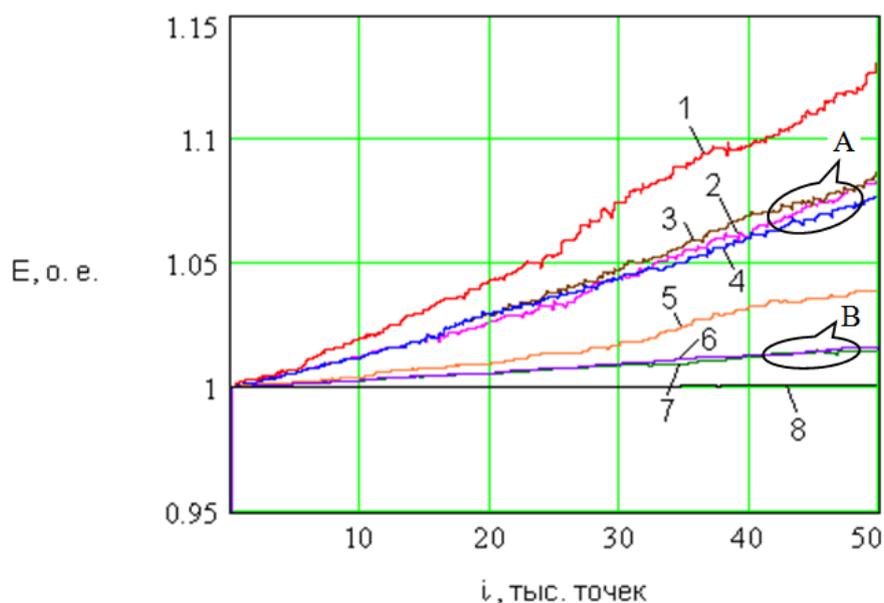


Рисунок 2.4 – Изменение общей энергии модели системы, обусловленное погрешностью моделирования

Таблица 2.1 – Перечень значений шага счета по времени и допустимой относительной погрешности итерационных приближений при вычислении угловых ускорений эксцентрически смещенных вращающихся масс

№ п/п	Шаг счета по времени, с	Относительная погрешность итераций, о. е.	Число итераций	Номер графика на рис. 2.4
1	0,001	0,1	6	1
2	0,001	0,01	10	2
3	0,001	0,001	14	3
4	0,001	0,0001	16	4
5	0,0005	0,1	4	5
6	0,0005	0,01	8	6
7	0,0005	0,001	12	7

В то же время дальнейшее уменьшение допустимой погрешности итераций с 0,01 о. е. до 0,0001 о. е. практически не улучшает качество моделирования (группы графиков «А» и «В»). При этом число итераций растет в 1,5...1,6 раз. В этой связи предлагается принимать допустимую погрешность итераций равной 0,01 о. е. при ограниченном вычислительном быстродействии ЭВМ, на которой производится моделирование, и значительной сложности модели. Если же время вычислительного эксперимента не является

---

критичным параметром, то допустимую погрешность итераций можно принять равной 0,001 или 0,0001 о. е. Уменьшение шага интегрирования по времени в данном случае обеспечит более значительный эффект, чем дальнейшее уменьшение допустимой погрешности итераций (группы графиков «А» и «В» на рис. 2.4).

Порядок вычисления угловых ускорений внутри одной итерации влияет на полученные значения в пределах допустимой погрешности, а, следовательно, и на форму траектории, которую отрабатывает система. Однако в любом случае модель остается адекватной: характер динамического процесса и энергетические характеристики системы не изменяются.

На рис. 2.5 приведены траектории трехмассовой системы связанных маятников в фазовом пространстве  $y(x)$  при различных порядках вычисления угловых ускорений внутри одной итерации:  $\varepsilon_1 \rightarrow \varepsilon_2 \rightarrow \varepsilon_3$  (а),  $\varepsilon_1 \rightarrow \varepsilon_3 \rightarrow \varepsilon_2$  (б),  $\varepsilon_2 \rightarrow \varepsilon_3 \rightarrow \varepsilon_1$  (в),  $\varepsilon_3 \rightarrow \varepsilon_2 \rightarrow \varepsilon_1$  (г). Выполнено моделирование для всех возможных порядков вычислений. На рис. 2.5 выделены тождественные области «А», «В» и «С», которые иллюстрируют близость начальных участков траекторий. В дальнейшем траектории расходятся, явные отличия указаны стрелками. Конечные положения маятников существенно различны. Однако характер процесса при этом не изменяется. Таким образом, порядок вычисления угловых ускорений эксцентрически смещенных вращающихся масс внутри одной итерации можно считать несущественным с точки зрения характера протекающих процессов и энергетических характеристик системы.

На рис. 2.6 и 2.7 приведены графики траекторий, описываемых системой в фазовом пространстве  $y(x)$  и во времени.

При одном и том же значении шага интегрирования по времени уменьшение допустимой погрешности итераций от 0,1 о. е. до 0,001 о. е. существенно улучшает качество модели по критерию постоянства полной энергии системы; дальнейшее уменьшение допустимой погрешности итераций практически не влияет на качество моделирования и не целесообразно, поскольку уменьшение шага счета по времени является в данном случае более эффективным.

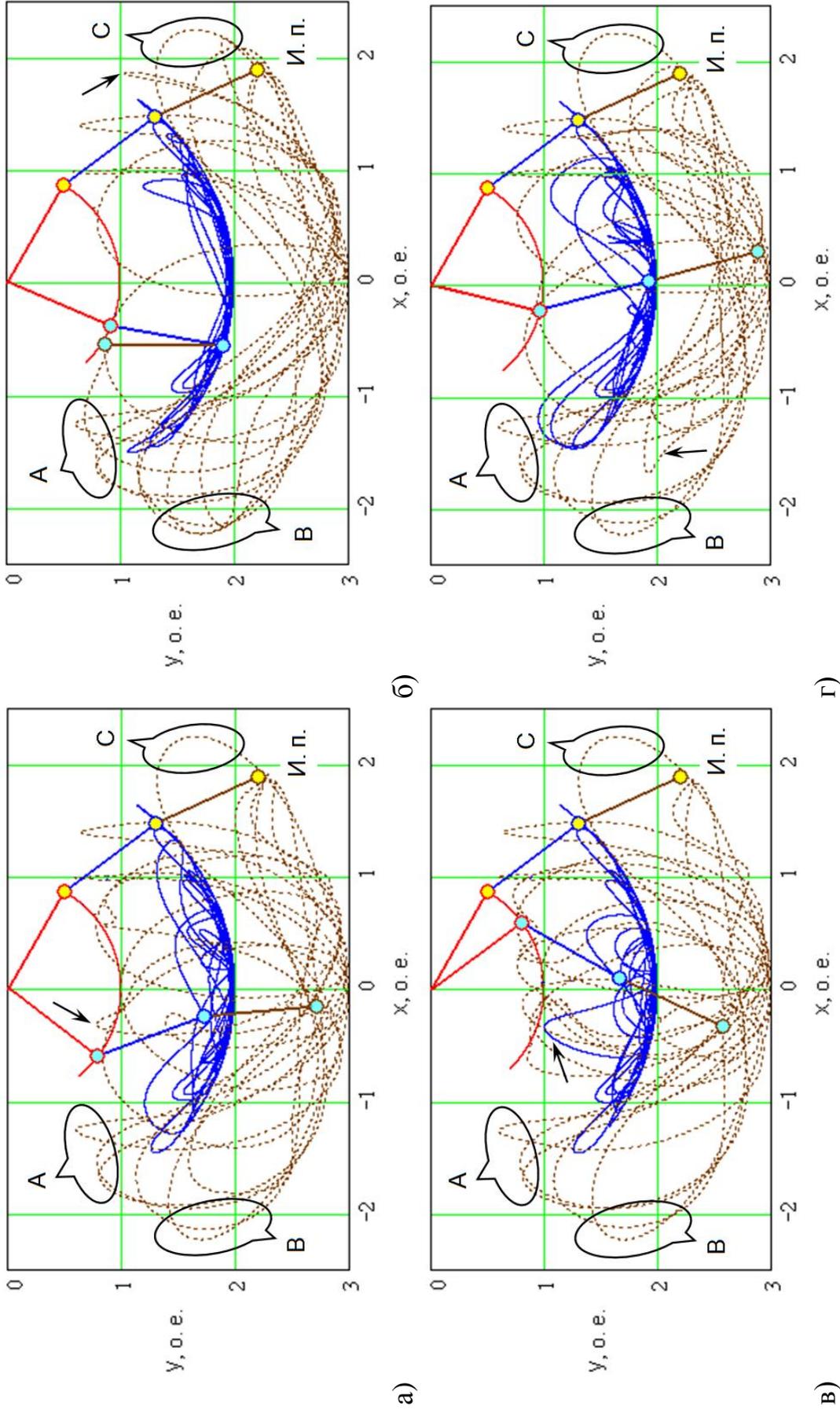
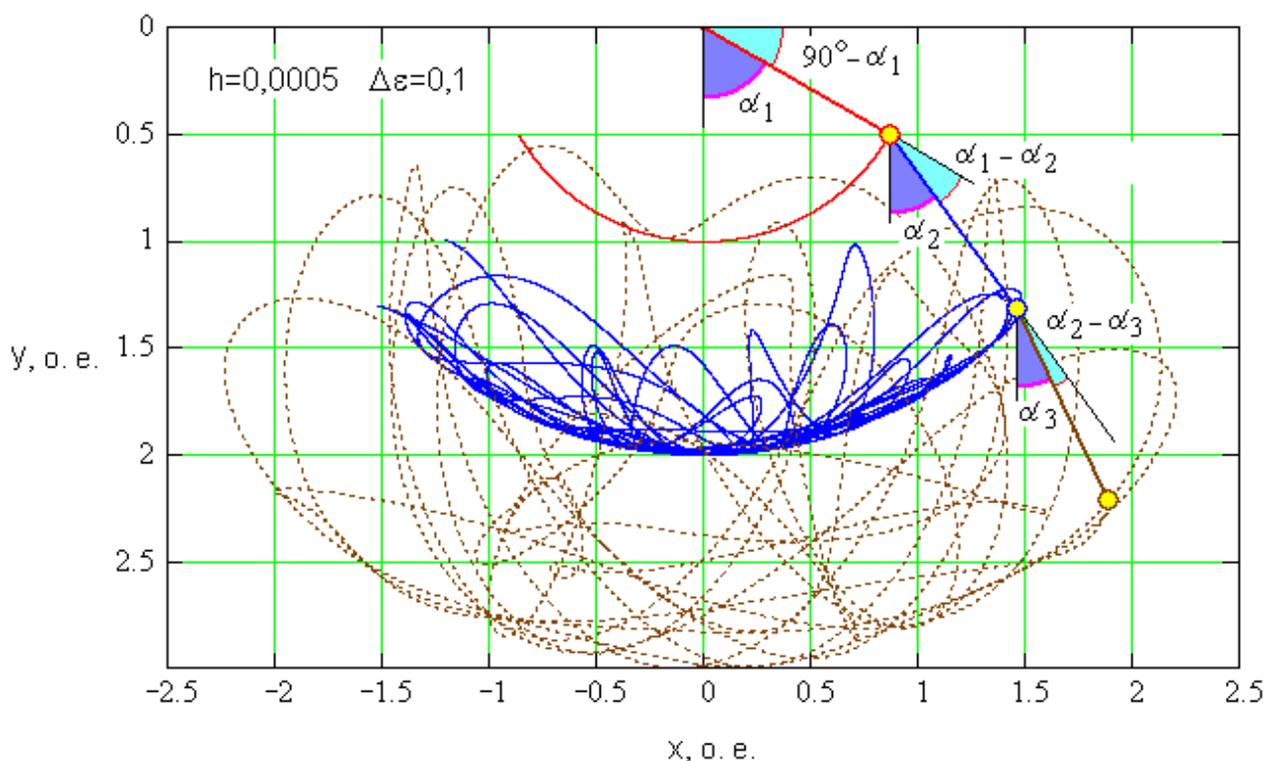
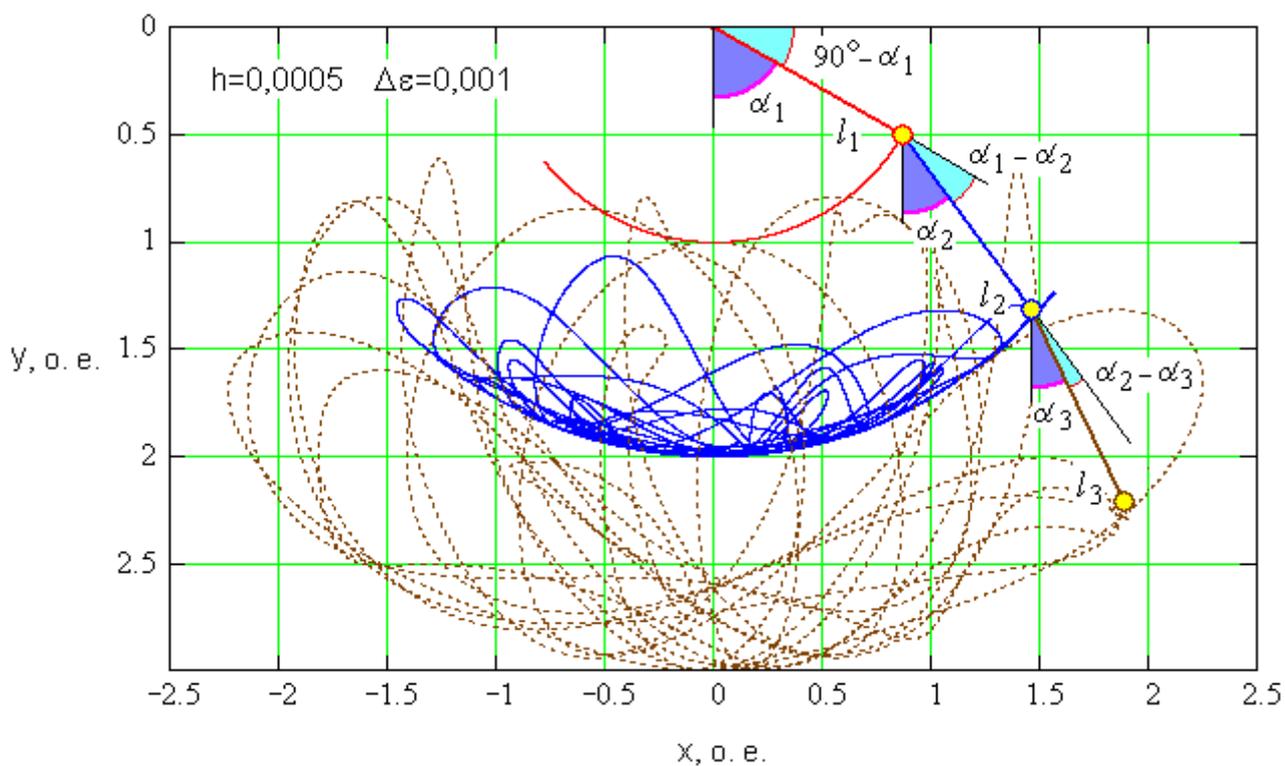


Рисунок 2.5 – Влияние изменения порядка вычисления угловых ускорений в пределах одной итерации на форму траектории: характер процесса остается неизменным (И. п. – исходное положение)



a)



б)

Рисунок 2.6 – Колебания трехплечевой маятниковой системы в плоскости  $x$ - $y$ :  
 а) погрешность итерационных приближений  $\Delta\varepsilon = 0,1$ ; б) погрешность итерационных приближений  $\Delta\varepsilon = 0,001$ ; характер процесса однотипен, однако траектории отличаются

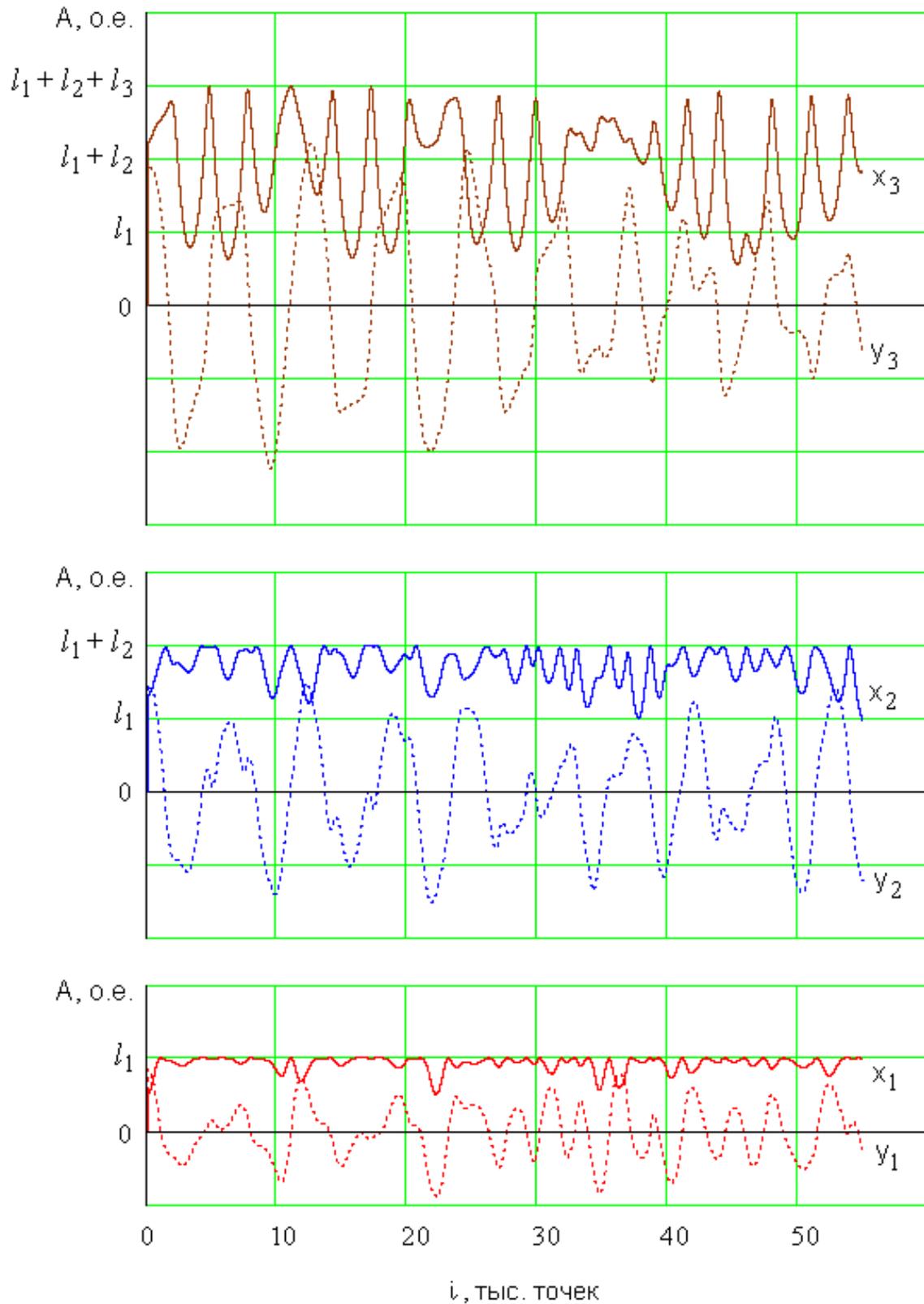


Рисунок 2.7 – Графики изменения координат во времени для центров масс трехплечевой системы маятников (хаотичность процесса, в особенности для третьего маятника, подтверждается хаотичностью возвратов Пуанкаре)

---

На рис. 2.8 представлены результаты моделирования трехплечевой системы маятников с маховиком, жестко закрепленным на оси вращения первого маятника. Несмотря на то, что с точки зрения кинематики добавление такого маховика аналогично увеличению массы груза  $m_1$  (поскольку центр вращения  $O_1$  неподвижен относительно системы координат), полученные для данной механической системы выражения интересны с точки зрения анализа происходящих процессов. Видно, что момент инерции маховика входит только в одно из трех уравнений Лагранжа как множитель в слагаемом  $J \cdot \ddot{\alpha}_1$ , поэтому данная механическая система может быть дополнена, например редуктором с заданным передаточным числом  $i$  или упруго деформируемым валом с жесткостью  $c$  (в последнем случае добавится еще одна степень свободы).

Рассмотрим случай, когда момент инерции маховика значительно превышает моменты инерции масс  $m_1$ ,  $m_2$  и  $m_3$ , посчитанные как моменты инерции материальных точек, вращающихся относительно  $O_1$  (в расчетах используем максимально возможные радиусы окружностей вращения 2-го и 3-го грузов  $R_2 = l_1 + l_2$ ,  $R_3 = l_1 + l_2 + l_3$ ). Как видно из рис. 2.8, а, точки траекторий центров масс грузов  $m_2$  и  $m_3$  составляют сложные фигуры явно фрактального характера. В их структуре можно увидеть подобие отдельных структурных элементов, составленных разными участками траекторий, наблюдаемое в разных масштабах (мелких и крупных). Например, фигура  $A$ , образованная участком окружности « $c$ » радиуса  $R_2$  и участками кривых « $a$ » и « $b$ » (где « $a$ », « $b$ » и « $c$ » – кривые, ограничивающие геометрическое место точек траектории центра массы груза  $m_2$ ), имеет геометрическое подобие с фигурой  $B$ , образованной участками той же траектории. Множество подобных фигур, в т. ч. и зеркальных, можно построить также на криволинейных отрезках траектории 3-го груза.

Для обеих траекторий характерными являются также структурные элементы, подобные фигуре  $C$  (четыреугольники, образованные замкнутой ломаной, состоящей из криволинейных отрезков – участков траектории). Данные элементы можно найти в различных местах рисунка, причем некоторые из них смещены друг относительно друга, а некоторые являются вложенными друг в друга; некоторые из них пространственно отделены от остальных, а

некоторые имеют общие вершины или стороны. Таким образом, очевидным является фрактальный характер фазовых траекторий рассматриваемой системы (который можно также описать как «сеточный» или «ячеистый»).

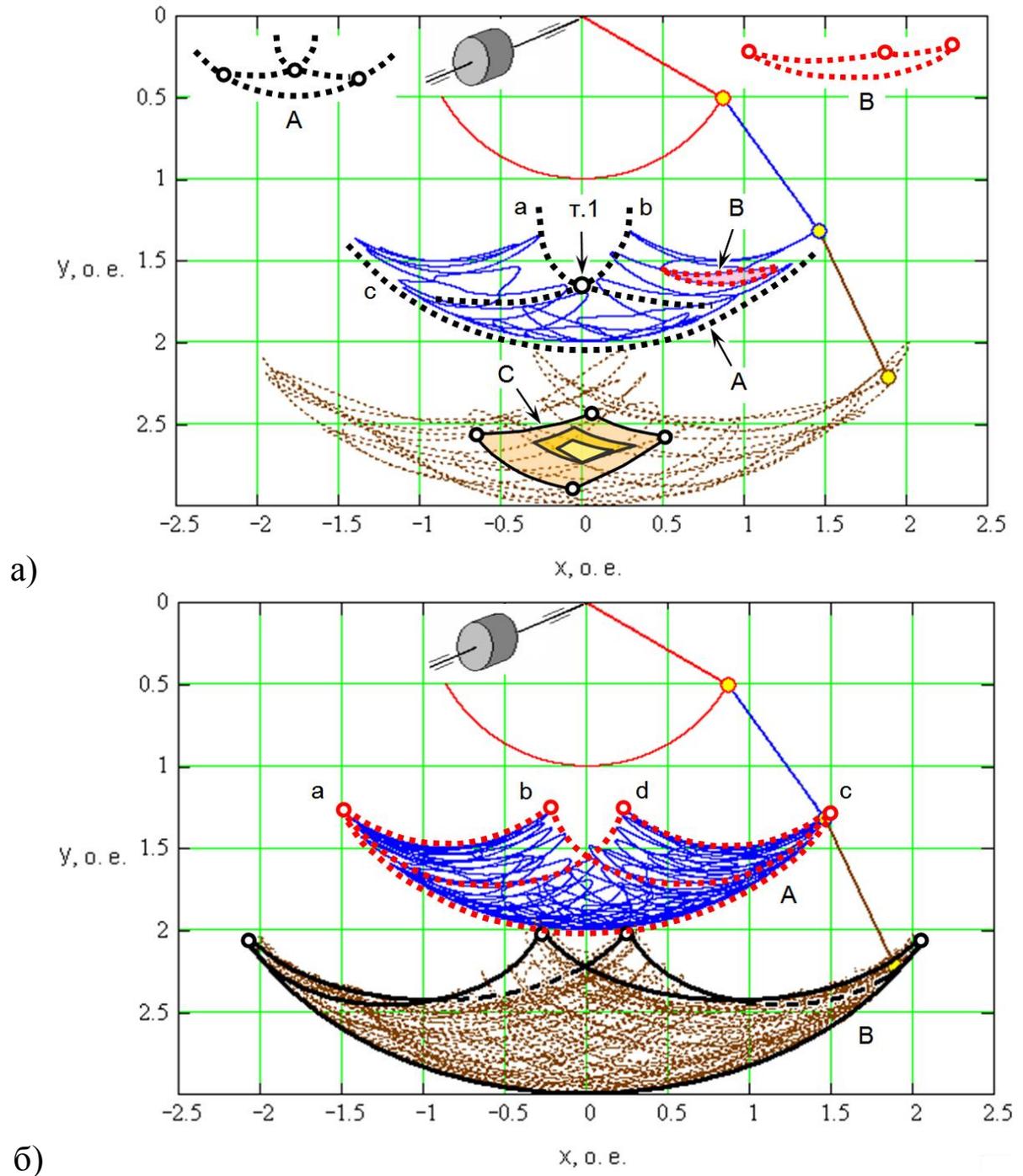


Рисунок 2.8 – Траектории, описываемые исследуемой механической системой при преобладающем влиянии момента инерции маховика: а) 75 тысяч точек; б) 255 тысяч точек

---

С другой стороны фигуру  $A$  на рис. 2.8, а можно рассматривать как часть видимого контура тора, спроектированного на плоскость (где  $t. 1$  – точка пересечения видимых контуров). Кроме того, фигура  $C$  также приближается к плоскому отображению четырехугольного участка поверхности гладкого тора. При увеличении числа точек моделирования (рис. 2.8, б) мелкие структурные элементы становятся неразборчивыми ввиду низкой разрешающей способности рисунка. Однако геометрическое подобие рассматриваемых фигур плоскому отображению четырехугольного участка поверхности гладкого тора становится еще более очевидным.

На рис. 2.9 приведены результаты моделирования движения той же системы маятников при других начальных условиях. Данные рисунки вызывают у наблюдателя стойкую иллюзию того, что он рассматривает траектории движения маятников в трехмерном пространстве, а не на плоскости (что не удивительно, т. к. рассматриваемая система имеет три степени свободы). Тот факт, что сложные фигуры, образованные точками траекторий центров масс, во-первых, имеют фрактальный характер, и, во-вторых, приближаются к гладким отображениям поверхностей на плоскость, позволяет нам утверждать, что движение данной системы можно анализировать с позиций теории катастроф (теории особенностей и бифуркаций). Задачей такого анализа может быть прогнозирование и предупреждение выходов из строя (поломок) оборудования, а также оценка воздействия отдельных подсистем на работу системы в целом.

Таким образом, поскольку большинство электромеханических и геомеханических систем состоят из механизмов и узлов с несколькими степенями свободы, которые характеризуются сложным вращательно-колебательным движением сосредоточенных и распределенных масс по криволинейным траекториям и при этом центры вращения могут совпадать с центрами масс и/или с осями шарнирных соединений, либо находятся в пределах геометрического места точек, определяемого имеющимися степенями свободы и геометрическими размерами деталей этих механизмов, то в общем случае центры вращения смещаются в процессе движения масс, описывая сложные траектории. Одним из необходимых условий адекватности программной модели механической или электромеханической системы с эксцентрически неуравновешенными вращающимися относительно нефиксированных центров массами является достоверное определение координат центров вращения и

векторов мгновенной скорости, в частности методом итерационных приближений.

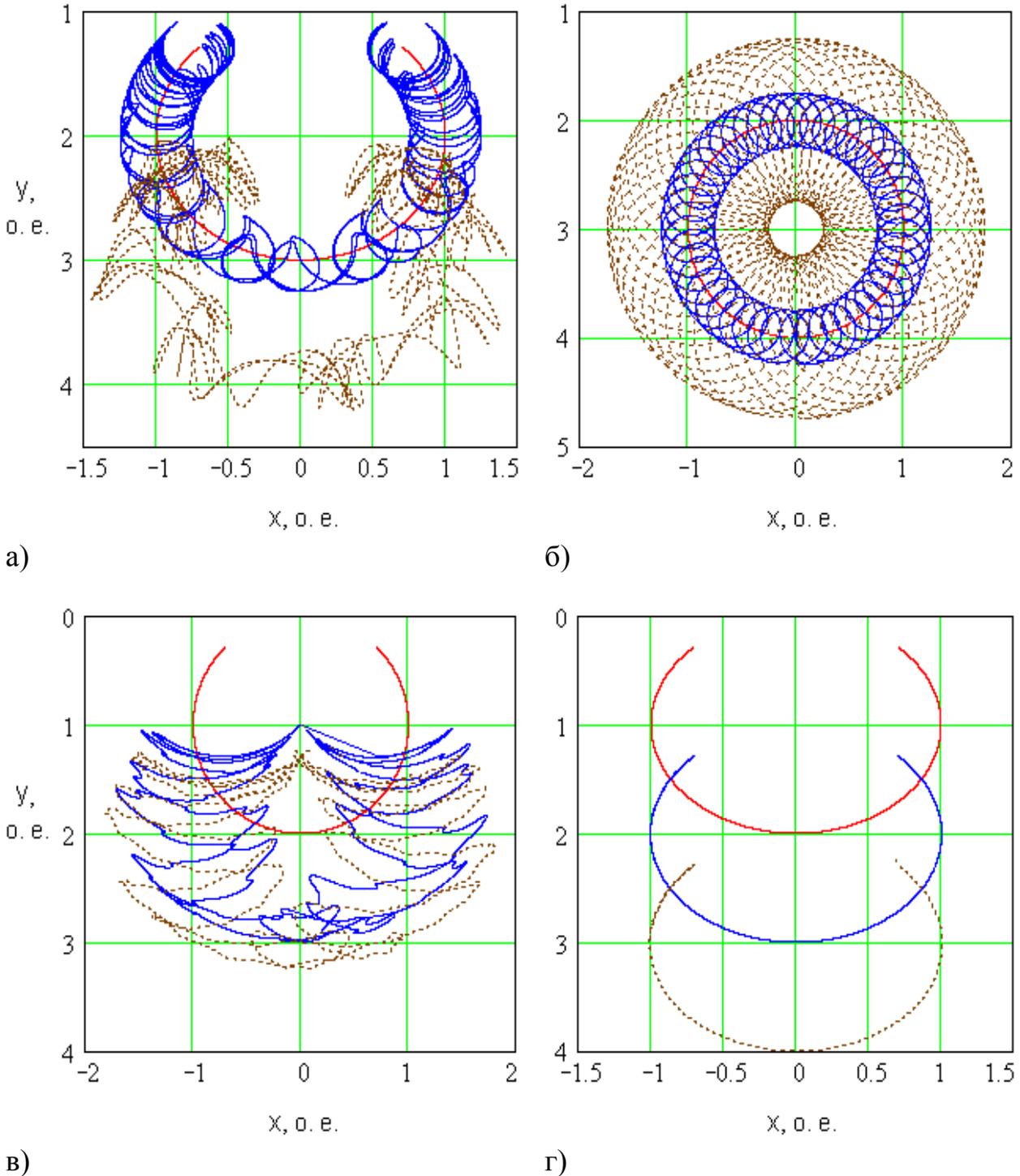


Рисунок 2.9 – Фазовые траектории, описываемые центрами масс маятников, движущихся в одной плоскости: траектории приближаются к отображениям различных криволинейных поверхностей на указанную плоскость

Расчеты показали, что для трехплечевой маятниковой системы старший ляпуновский показатель, определенный по алгоритму

Бенеттина, положителен и в зависимости от конкретных начальных условий принимает значения от 0,2 до 1,7. О подобии работы генераторов динамического хаоса и хаотических процессов, полученных методом математического моделирования трехмаятниковой системы, можно судить на основе сопоставлений рис. 2.10 и рис. 2.4, 2.5, 2.6, 2.8, 2.9.

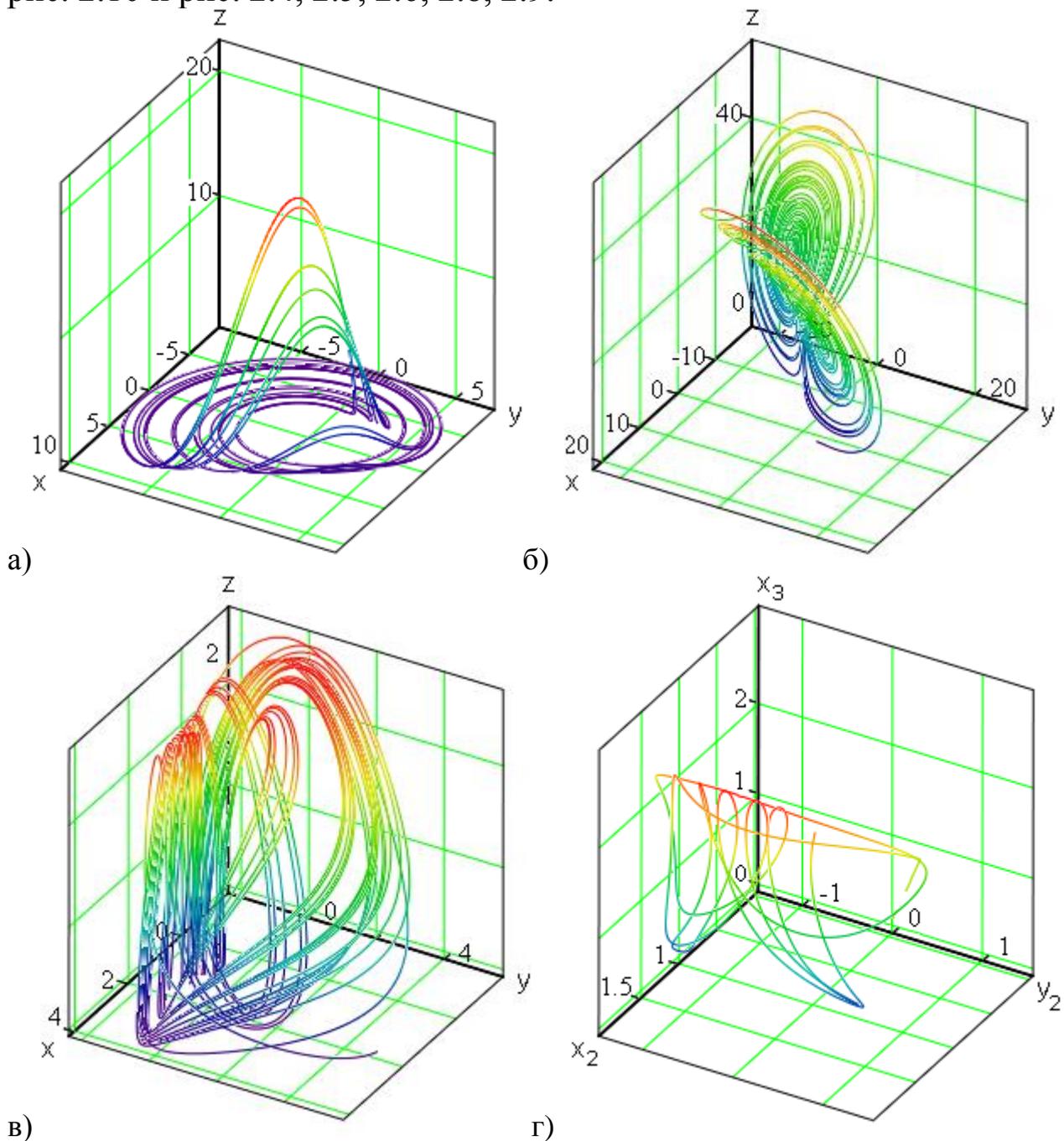


Рисунок 2.10 – Траектории, описываемые некоторыми хаотическими системами в трехмерном фазовом пространстве: а) система Ресслера; б) система Лоренца; в) генератор Ван дер Поля; г) трехмассовая система маятников

### 2.3 Исследование и анализ динамических процессов в протяженных геотехнических системах на основе пружинных маятников

Итак, на примере системы математических маятников нами предложена методика аналитического моделирования хаотических процессов в материальных системах на основе методов аналитической механики с использованием уравнений Лагранжа [50]. Рассмотрим возможности этой методики для оценки и прогноза динамического состояния реальных технических систем, отработки параметров и критериев контроля хаотических и синергетических процессов.

Как известно, в технике весьма часто встречаются объекты, которые при определенных допущениях можно условно представить как  $k$ -массовую систему пружинных математических или физических маятников (горные выработки, закрепленные арочной крепью, железнодорожные, рудничные и шахтные составы, транспортные системы непрерывного действия, гидротранспорт пульпы, внутримельничная загрузка, линии электропередачи, различные строительные сооружения, протяженные мосты, перекрытия и арочные конструкции и тому подобное). При этом, также известны труднообъяснимые случаи крушения поездов, обрушения мостов, например моста Такома Нэрроуз, Вашингтон, который разрушился в 1940 году через четыре месяца после введения в строй из-за упругих крутильных колебаний от воздействия ровного, но сравнительно сильного ветра (около 42 миль в час) [109].

Вначале рассмотрим материальную систему, схема которой представлена на рис. 2.11 (а) – систему пружинных маятников, состоящую из трех грузов с массами  $m_1$ ,  $m_2$  и  $m_3$  и пружин с жесткостями  $c_1$ ,  $c_2$  и  $c_3$ . Прямая, по которой движутся грузы, горизонтальная и абсолютно гладкая. За обобщенные координаты целесообразно принять расстояния центров грузов в текущем положении относительно положения, при котором все пружины находятся в свободном состоянии. Тогда можно пренебречь размерами грузов при условии их центральной симметрии и длинами пружин, если они достаточно велики, чтобы исключить соударения грузов. В работе [17] приводятся уравнения движения такой системы. Выполненные нами расчеты с помощью Mathcad показали, что для системы из трех пружинных маятников практически сохраняется

детерминированное движение, однако при этом необходимо учесть, что методы приближенных вычислений уже сами вносят весьма малую нелинейность.

Схема  $k$ -массовой системы пружинных маятников представлена на рис. 2.11 (б). Получим уравнения движения центров масс для грузов, составляющих такую систему. Кинетическая  $T$  и потенциальная  $\Pi$  энергии системы равны [57]:

$$T = \frac{1}{2}m_1\dot{x}_1^2 + \dots + \frac{1}{2}m_j\dot{x}_j^2 + \dots + \frac{1}{2}m_k\dot{x}_k^2, \quad (2.31)$$

$$\Pi = \frac{1}{2}c_1x_1^2 + \dots + \frac{1}{2}c_j(x_j - x_{j-1})^2 + \dots + \frac{1}{2}c_k(x_k - x_{k-1})^2, \quad j \in 2 \dots k - 1, \quad (2.32)$$

где  $m_j$  – масса  $j$ -го груза,  $x_j$  – мгновенная координата его центра, совпадающая с центром тяжести;  $c_j$  – жесткость пружины, соединяющей текущий  $j$ -й груз с грузом под номером  $j-1$ ;  $k$  – количество грузов в одномерной цепочке.

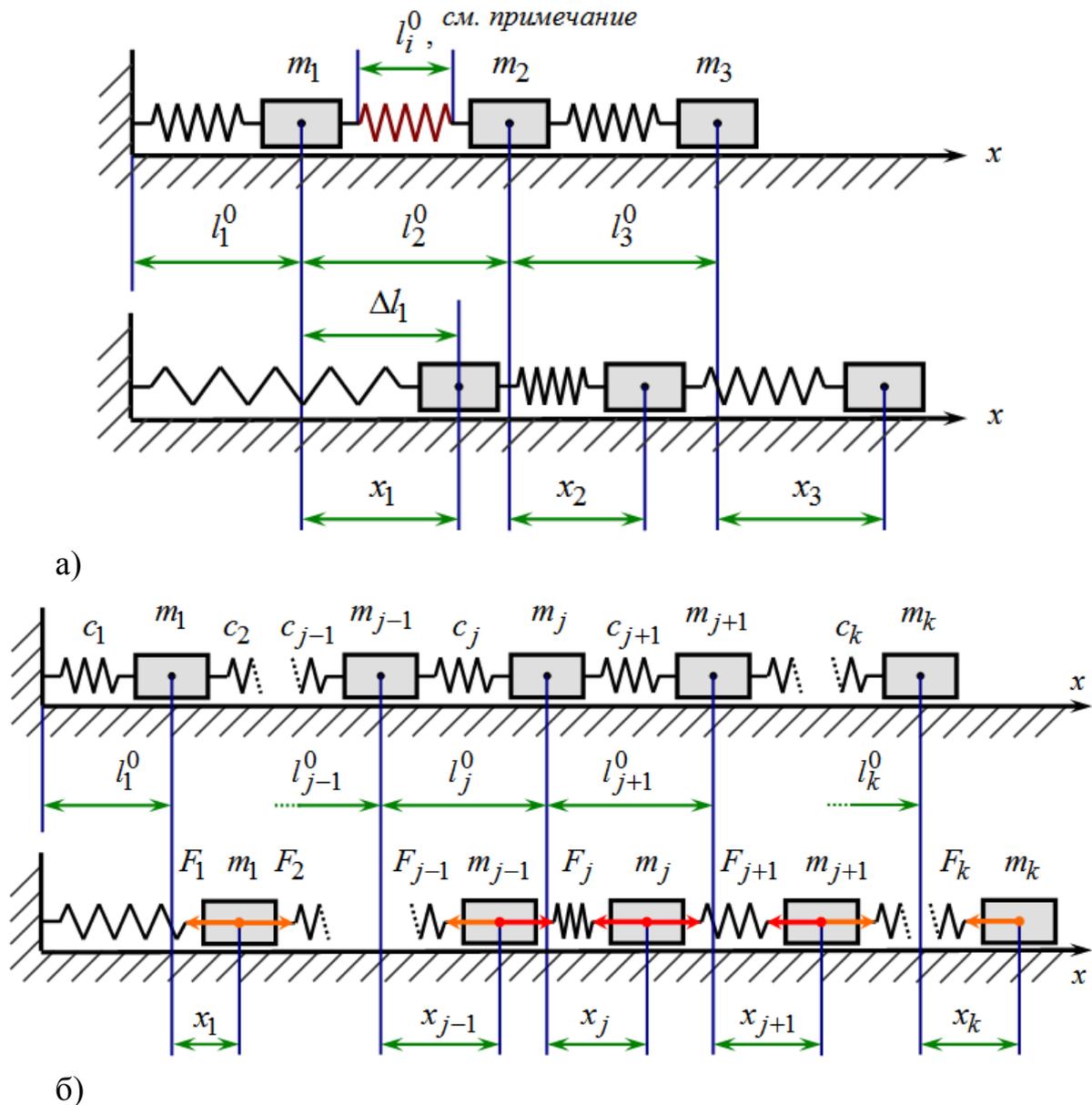
Составив функцию Лагранжа  $L = T - \Pi$ , находим ее частные производные по координатам и скоростям изменения координат во времени:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial x_1} &= -c_1x_1 + c_2(x_2 - x_1), \dots, \\ \frac{\partial L}{\partial x_j} &= -c_j(x_j - x_{j-1}) + c_{j+1}(x_{j+1} - x_j), \dots, \end{aligned} \quad (2.33)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial x_k} &= -c_k(x_k - x_{k-1}); \\ \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_1} &= m_1\dot{x}_1, \dots, \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_j} = m_j\dot{x}_j, \dots, \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_k} = m_k\dot{x}_k. \end{aligned} \quad (2.34)$$

Итак, уравнения движения центров масс грузов в рассматриваемой системе имеют вид:

$$\begin{aligned} m_1\ddot{x}_1 + c_1x_1 - c_2(x_2 - x_1) &= 0, \dots, \\ m_j\ddot{x}_j + c_j(x_j - x_{j-1}) - c_{j+1}(x_{j+1} - x_j) &= 0, \dots, \\ m_k\ddot{x}_k + c_k(x_k - x_{k-1}) &= 0. \end{aligned} \quad (2.35)$$



Примечание: грузы считать материальными точками, длина пружины  $l_j^0$  равна расстоянию между центрами масс грузов в состоянии равновесия сил

Рисунок 2.11 – Расчетная схема для моделирования динамики 3-массовой (а) и k-массовой (б) систем пружинных маятников

На рис. 2.12 с помощью Mathcad получены графики траекторий, описываемых центрами масс системы из 4-х пружинных маятников, в фазовой плоскости  $x_i = f(x_j)$ , а на рис. 2.13 – графики фазовых траекторий этой же системы в зависимости от начальной скорости возбуждения в координатах  $x_i = f(v_j)$ . Анализируя эти рисунки, мы четко видим признаки хаотизации такой системы, а именно, признаки детерминированного хаоса: 1) траектории, описываемые центрами масс системы, образуют канторово подобное множество

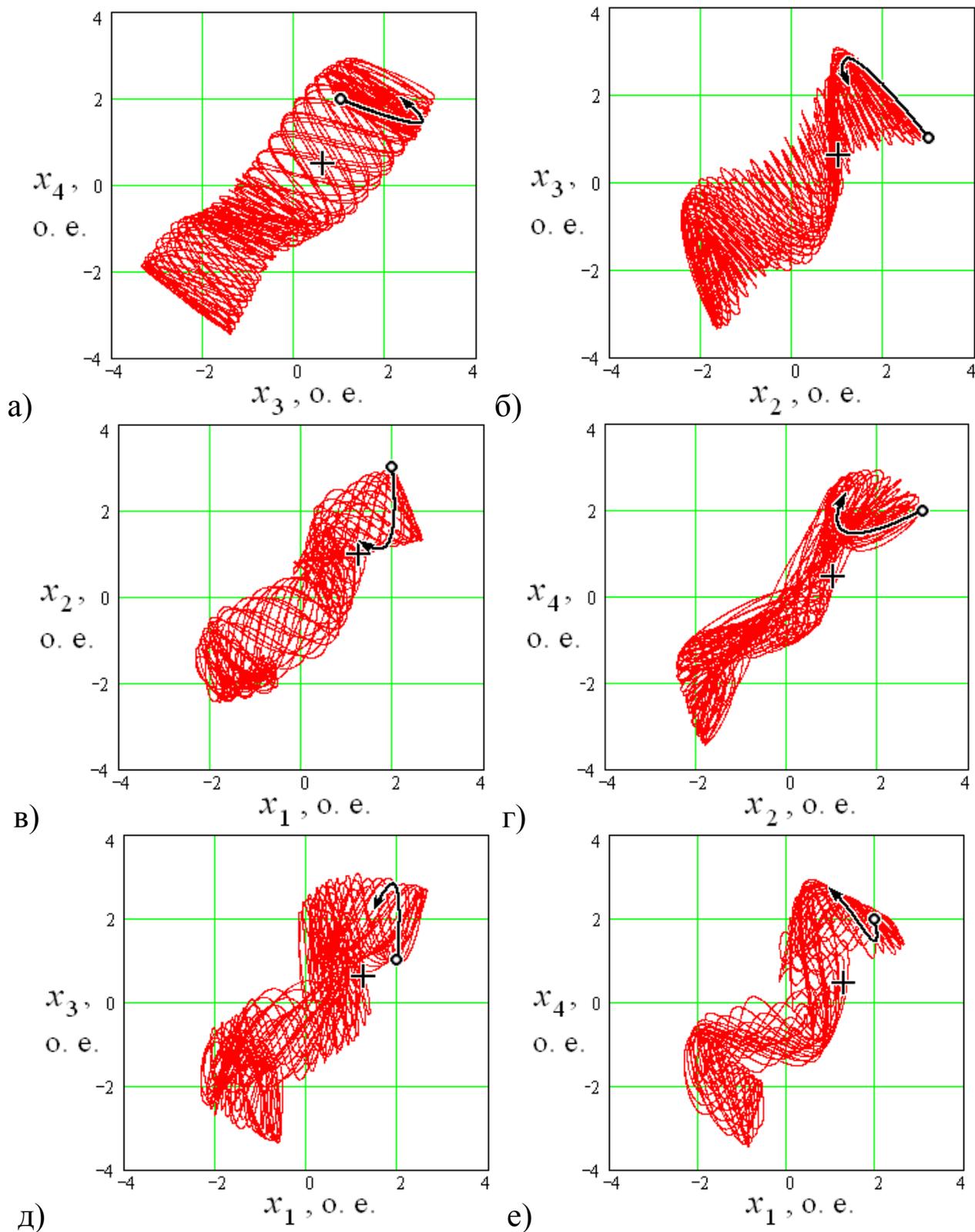


Рисунок 2.12 – Графики траекторий, описываемых центрами масс системы из 4-х пружинных маятников в фазовой плоскости  $x_i = f(x_j)$ ; знаками обозначены: «o» – начальная точка траектории, «+» – конечная точка при  $n = 5 \times 10^4$

(см. рис. 2.12, а в зоне «+» и так далее); 2) фазовые траектории системы возвращаются в ограниченную область пространства; 3) хаотические движения подчиняются регулярным законам и за ними «стоит» не бесформенный хаос, а хаос со спрятанным порядком – фрактальные структуры с асимметричными перебросками фазовых траекторий, рис. 2.13 (см. асимметричные фракталы); 4) весьма слабая, но все же зависимость от начального состояния системы (см. относительные смещения начальных точек траекторий и промежуточных, а для изображений на рис. 2.12 и 2.13 конечных точек при  $n = 5 \times 10^4$  ).

Как уже отмечалось в первом и во втором разделах, бифуркации являются ключевым фактором как пространственно-временной хаотизации, так и самоорганизации процессов, они возникают, прежде всего, в открытых системах, в которые возможен приток внешней энергии. Такими системами априори являются напряженные породные массивы и строительные конструкции, электрические сети и горные машины. Неконтролируемый приток энергии, например, в результате проявлений горного давления, короткого замыкания, может приводить к весьма тяжелым последствиям, в результате которых объекты теряют свою устойчивость и разрушаются.

На рис. 2.14 приведены результаты исследования волновых процессов, процессов хаотизации и самоорганизации в системе пружинных маятников (15 грузов). Как видно из рис. 2.14, а жесткий удар по первому маятнику с амплитудой 3 о. е. трансформируется в затухающие колебания, которые практически затухают по времени до значения 2000, но они при этом постепенно трансформируются в бифуркации Гопфа для смежных маятников. При достижении относительного временного значения 4000 самый дальний маятник попадает в условия бифуркации Питчфорка, для которой характерно удвоение периода (стоячие волны).

Таким образом, на модели можно одновременно наблюдать переход от устойчивого состояния равновесия к странному аттрактору непосредственно сразу скачком при жесткой потере устойчивости (рис. 2.14, а и рис. 1.2, б), возникновение мягкой потери устойчивости (рис. 2.14, а и рис. 1.2, а) и «сценарий» хаотизации колебательного процесса (рис. 2.14, а и рис. 1.2, в).

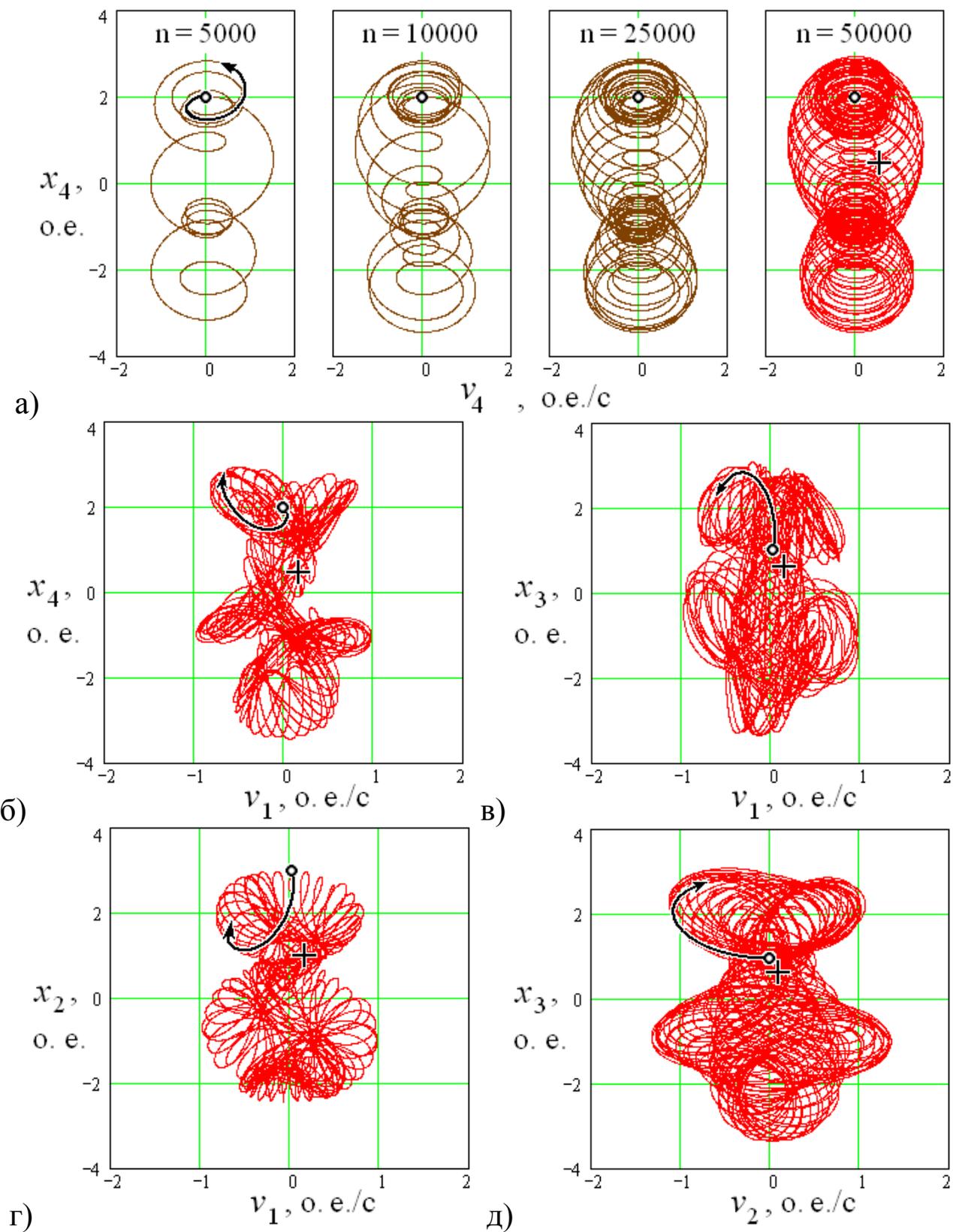


Рисунок 2.13 – Некоторые графики фазовых траекторий системы из 4-х пружинных маятников в координатных системах  $x_i = f(v_j)$ ; «o» – начальная точка траектории, «+» – конечная точка при  $n = 5 \times 10^4$ .

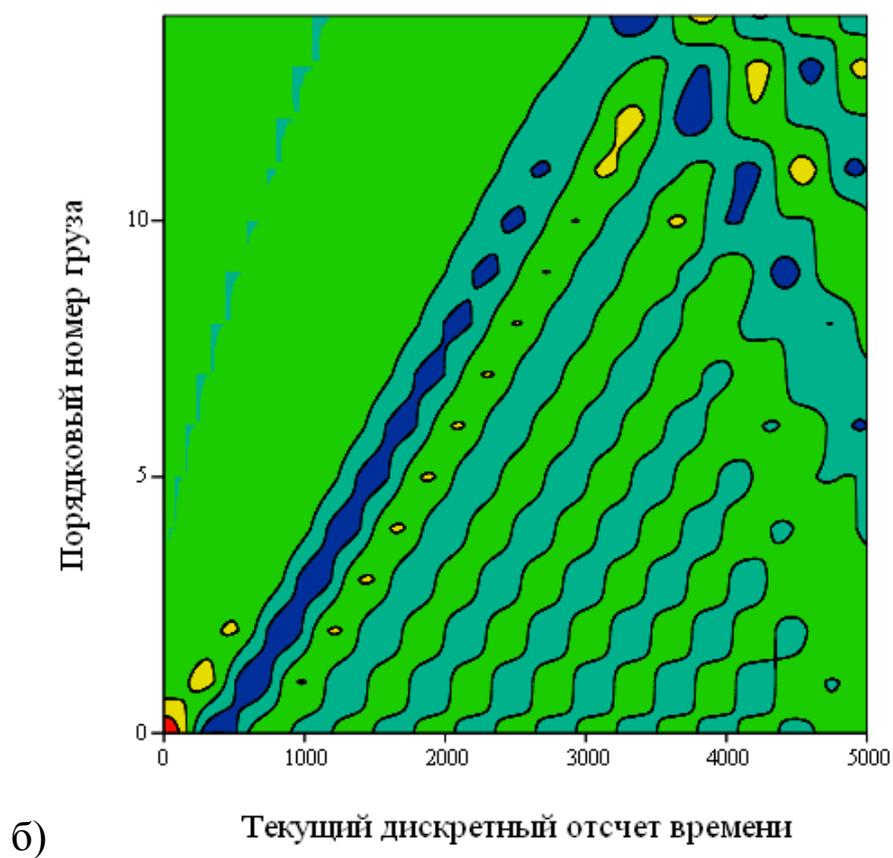
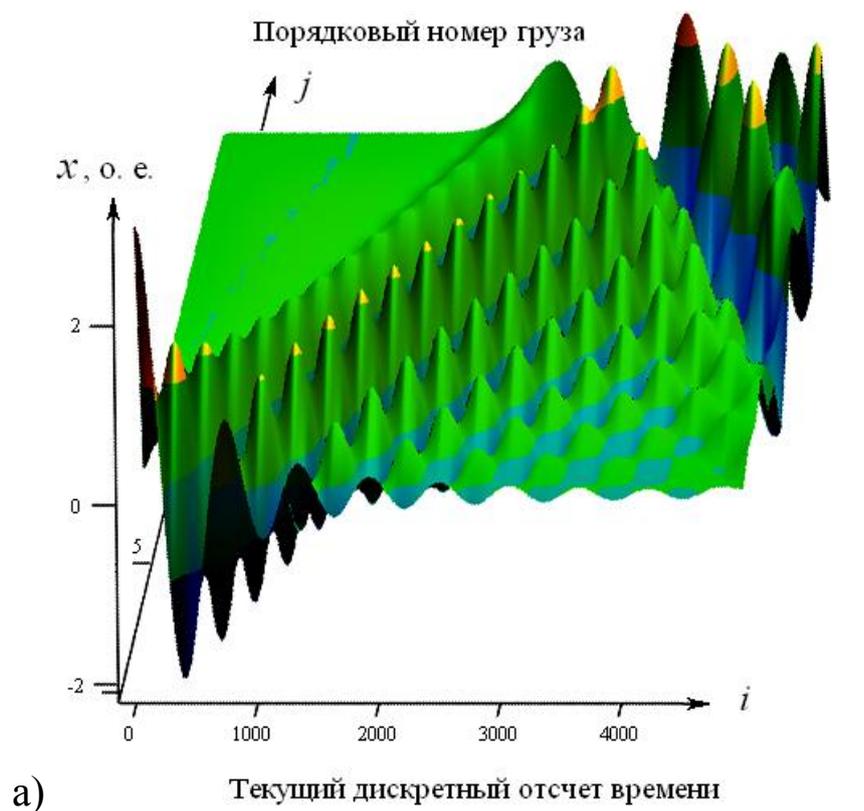


Рисунок 2. 14 – Волновые процессы и самоорганизация в системе пружинных маятников (15 грузов): а) отображение в виде поверхности; б) отображение в виде карты эквипотенциальных линий

---

Введем допущение, что каждый из грузов рассматриваемой системы является элементом, который в любой момент времени может находиться в одном из нескольких возможных состояний (количество возможных состояний является конечным целым положительным числом). В простейшем случае можно ограничиться двумя состояниями: активным и пассивным, т. е. считать элементы системы бинарными. Тогда данная система будет являться клеточным автоматом – одной из разновидностей распределенных активных сред, состоящей из активных элементов, имеющих дискретное число состояний и изменяющих свое состояние в зависимости от состояния соседних элементов и самого себя в соответствии с правилами переходов.

Процессы, происходящие в системе пружинных маятников, можно рассматривать с точки зрения теории распределенных активных сред. Очевидно, что каждый из грузов рассматриваемой системы является элементом одномерной распределенной активной среды, поскольку: а) он может обладать кинетической энергией линейного либо криволинейного движения; б) он может обладать потенциальной энергией упругих деформаций соединительных пружин; в) каждый элемент соединен только с соседними элементами и внутри системы взаимодействует только с ними; г) возможен обмен энергией между соседними элементами, а также возможны процессы преобразования видов энергии; д) каждый элемент может поглощать энергию из внешней среды (например, посредством механического воздействия на него), отдавать энергию во внешнюю среду (например, посредством трения) либо же система может быть замкнутой и ее полная энергия будет неизменной (при отсутствии поглощения).

Для моделирования и анализа процессов, происходящих в такой системе, можно применить теорию дискретных автоматов. В ряде случаев это может позволить упростить и ускорить моделирование на персональной ЭВМ (при значительном числе грузов), а главное – формализовать подход при анализе противоположных, но взаимосвязанных процессов хаотизации и самоорганизации [68].

Находящимся в пассивном состоянии будем считать элемент, не обладающий кинетической энергией, положение которого совпадает с началом координат. Соответственно элемент, обладающий кинетической энергией и (или) имеющий координату, отличную от нуля, находится в активном состоянии. В линейной цепочке

элементов возможны следующие варианты развития волновых процессов как ответ на однократное внешнее импульсное воздействие: а) волна переключения распространяется в случае, если под воздействием соседнего элемента рассматриваемый элемент переходит из менее стабильного (метастабильного) в более стабильное стационарное состояние; б) вдоль цепочки мультивибраторных элементов возможно распространение одиночного импульса волны возбуждения, если рассматриваемый элемент может быть выведен из состояния равновесия только соседним элементом, находящимся на ранних стадиях возбуждения; в) в случае, если рассматриваемый элемент может быть выведен из состояния равновесия соседним элементом, находящимся в любой стадии возбуждения, в цепочке возникает незатухающая волновая активность.

Как видно из рис. 2.15, в рассматриваемой замкнутой системе маятников возникают незатухающие волны, распространяющиеся вдоль цепочки и отражающиеся от краев. В случае одиночного импульсного возбуждения эти волны можно назвать волнами возбуждения, которые образуют фрактальные структуры.

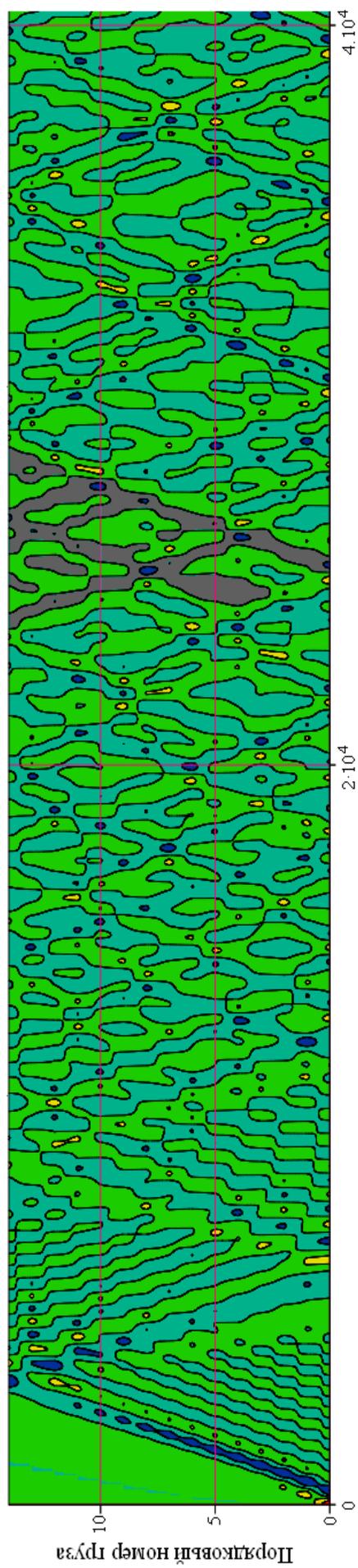
Для полносвязной системы пружинных маятников (на примере трехмассовой системы, как частного случая  $k$ -массовой, см. рис. 2.16) имеем:

$$T = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 m_j \dot{x}_j^2, \quad (2.36)$$

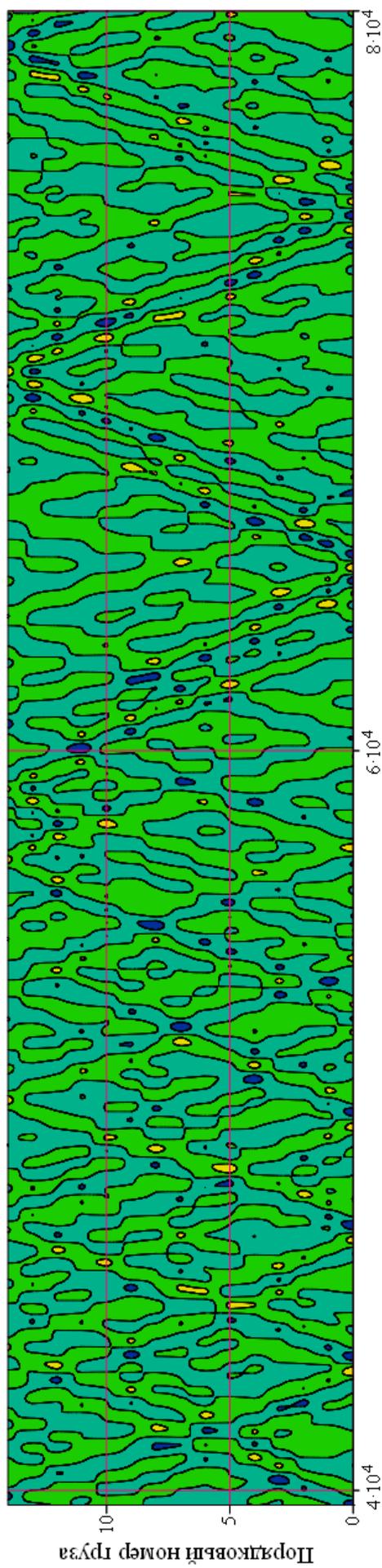
$$\Pi = \frac{1}{2} (c_{01} x_1^2 + c_{02} x_2^2 + c_{03} x_3^2 + c_{12} (x_2 - x_1)^2 + c_{13} (x_3 - x_1)^2 + c_{23} (x_3 - x_2)^2).$$

Выполнив преобразования, аналогичные приведенным выше, получим итоговые уравнения движения центров масс грузов для полносвязной системы пружинных маятников:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + c_{01} x_1 - c_{12} (x_2 - x_1) - c_{13} (x_3 - x_1) &= 0, \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_{02} x_2 + c_{12} (x_2 - x_1) - c_{23} (x_3 - x_2) &= 0, \\ m_3 \ddot{x}_3 + c_{03} x_3 + c_{13} (x_3 - x_1) + c_{23} (x_3 - x_2) &= 0. \end{aligned} \quad (2.37)$$



Текущий дискретный отсчет времени



Текущий дискретный отсчет времени

Рисунок 2.15 – Этапное развитие волновых процессов в многомассовой системе пружинных маятников: хаотизация – упорядочивание – хаотизация... (темным цветом выделены волны, организующие фрактальную структуру)

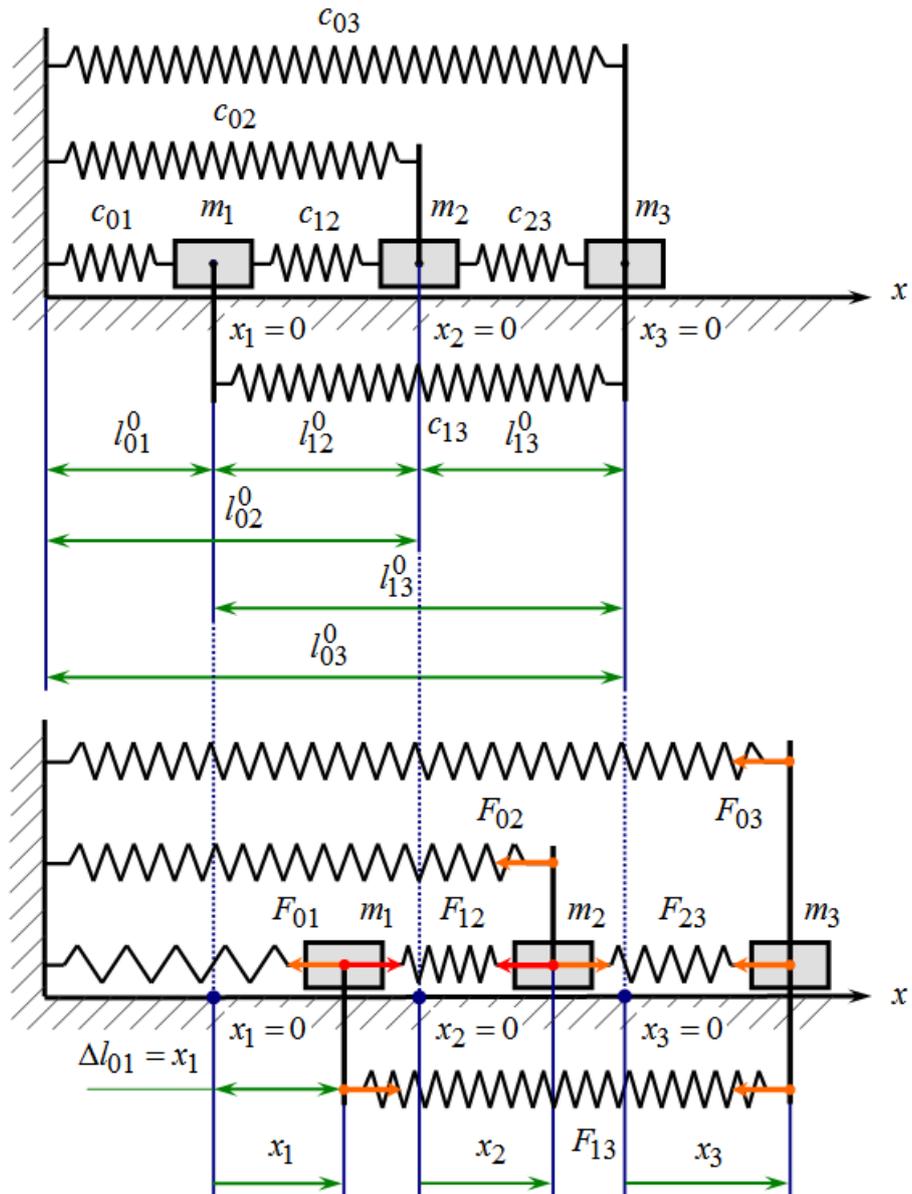


Рисунок 2.16 – Полносвязная система пружинных маятников (пример трехмассовой системы, как частный случай  $k$ -массовой системы)

Матрица жесткостей пружин для данной системы:

$$C = \begin{bmatrix} 0 & c_{01} & c_{02} & c_{03} \\ 0 & 0 & c_{12} & c_{13} \\ 0 & 0 & 0 & c_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.38)$$

В общем случае для  $k$ -массовой полностью связной системы пружинных маятников получаем  $k$  уравнений:

$$\begin{aligned}
& m_1 \ddot{x}_1 + c_{01} x_1 - \sum_{j=2}^k c_{1j} (x_j - x_1) = 0, \\
& m_i \ddot{x}_i + c_{0i} x_i + \sum_{j=1}^{i-1} c_{ji} (x_i - x_j) - \sum_{j=i+1}^k c_{ij} (x_j - x_i) = 0, \text{ для } i = 2, 3, \dots, k-1 \\
& m_k \ddot{x}_k + c_{0k} x_k + \sum_{j=1}^{k-1} c_{jk} (x_k - x_j), \tag{2.39}
\end{aligned}$$

где  $i$  – номер уравнения.

Примечание: для сохранения общепринятого порядка обозначения и нумерации элементов двумерных матриц индексные переменные обозначим латинскими буквами  $i$  и  $j$  (ранее принято:  $i$  – номер текущей точки развертки по времени графика изменения физической величины,  $j$  – номер груза в одномерной цепочке; и в дальнейшем будем придерживаться принятых ранее обозначений).

Матрица жесткостей для общего случая представляет собой квадратную матрицу с ненулевыми элементами, расположенными над главной диагональю:

$$C = \begin{bmatrix} 0 & c_{01} & \dots & c_{0i} & \dots & c_{0\{k-1\}} & c_{0k} \\ 0 & 0 & \dots & c_{1i} & \dots & c_{1\{k-1\}} & c_{1k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & c_{j\{k-1\}} & c_{jk} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & c_{\{k-1\}k} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{2.40}$$

Как и ранее при создании моделей полностью связанных пружинных маятников приняты следующие допущения: грузы являются материальными точками; пружины невесомы и работают в зоне упругих деформаций; длины пружин равны расстояниям между центрами соответствующих грузов; в общем случае не учитываются силы внутреннего трения и трения грузов об опорную поверхность.

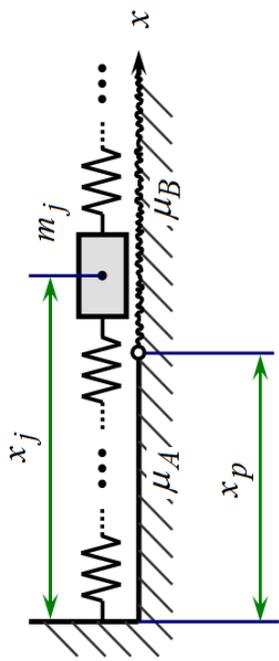
Критерии подобия используемых моделей и моделируемых технических систем: структурное подобие (чередование инерционных и упругих элементов), физическое подобие

(использование математического описания физических процессов, происходящих в моделируемой системе на основе классических законов механики и теоретических основ электротехники), геометрическое подобие (рассмотрены линейные цепочки элементов, выстроенных вдоль прямой либо вдоль ломаной или кривой требуемого характера; геометрическая масштабность обеспечивается тем, что грузы рассматриваются как материальные точки, а координаты их центров отсчитываются от соответствующих начальных координат в равновесном состоянии, т. е. размеры грузов и длины пружин могут не учитываться).

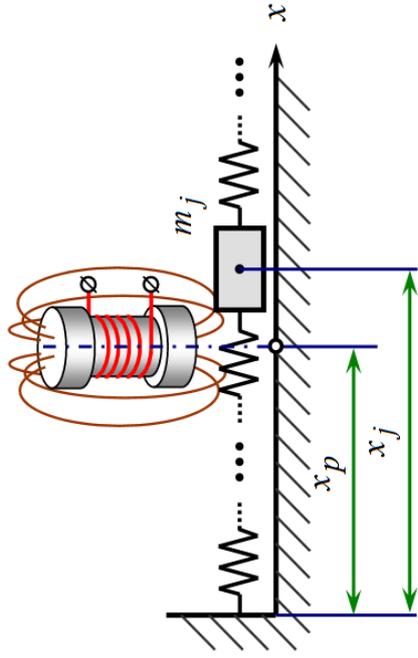
Итак, в пружинных маятниковых системах явно преобладают процессы самоорганизации, проявляющиеся в возникновении упорядоченных пространственно-временных структур фрактального характера, чередующиеся с процессами хаотизации, выраженными не столь явно. Введение в модели чисто нелинейных элементов значительно расширяет их возможности.

Для целенаправленного усиления тенденций хаотизации можно ввести в систему дополнительные нелинейные элементы (рис. 2.17): механические, магнитные, электромагнитные, чисто функциональные (элементы конструкции или математические зависимости) и т. д. Введение нелинейности в данной работе преследует две цели: 1) создание моделей для исследований и развития теории систем динамического хаоса; 2) приближение моделей к реальным техническим системам, например, введение нелинейностей вида «люфт» позволяет более точно промоделировать механические и электромагнитные переходные процессы в системе «локомотив на электрической тяге – прицепные вагоны» при трогании (начале движения) поезда, смене ходовой или тормозной позиции командоконтроллера, остановке поезда, изменении плана и профиля пути, формировании поезда с использованием автосцепки и др.

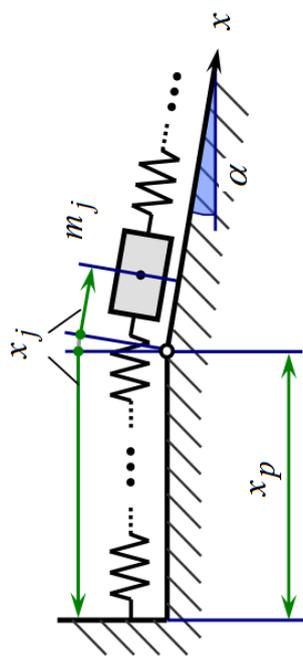
Предложены к апробации следующие виды нелинейностей: изменение коэффициента трения подошвы груза о поверхность скольжения (рис. 2.17, а), комбинирование пружинных и гравитационных маятников с плавным или скачкообразным изменением наклона поверхности скольжения грузов (рис. 2.17, б), введение постоянных магнитов или электромагнитов (рис. 2.17, в, г), учет пластического деформирования пружин, установка пневматических демпферов, введение люфтов и функционально заданных нелинейностей.



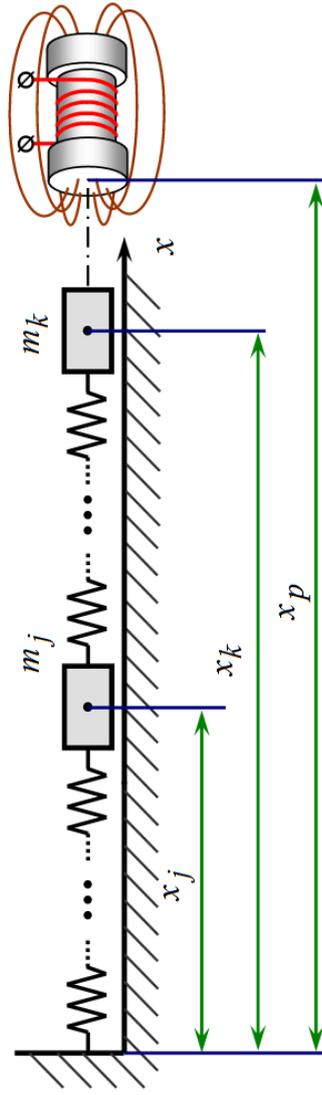
а)



б)



б)



г)

Рисунок 2.17 – Возможные варианты дополнительных нелинейностей в моделях многомассовых систем пружинных маятников: а) с изменяющимся коэффициентом трения; б) комбинация пружинного и гравитационного маятников; в) и г) – электромеханические системы с электромагнитами

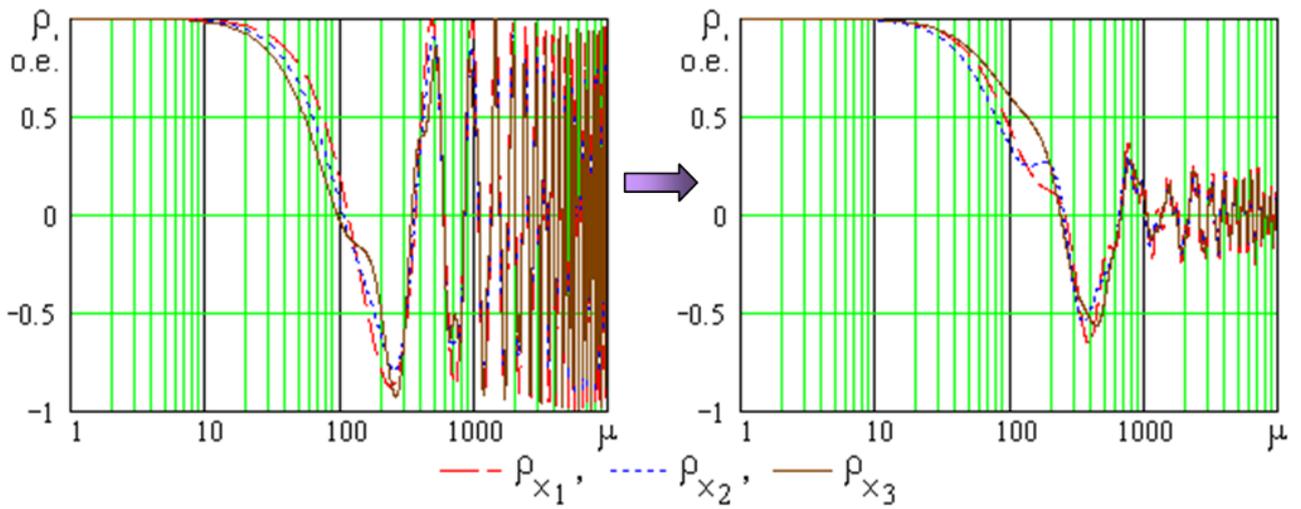
При моделировании и анализе результатов учитываем, что введение некоторых нелинейных элементов, таких как, например, трущиеся поверхности или пневматические демпферы, приводит к тому, что система становится открытой, и ее полная энергия будет уменьшаться плавно или порциями. Эти потери следует вычислять и учитывать, если в качестве критерия адекватности модели используется постоянство полной энергии системы.

Анализ поведения системы в целом, отдельных ее элементов, а также спектральных характеристик сигналов и функций автокорреляции показывает, что введение нелинейности приводит к усиленной хаотизации системы: энергия сигналов распределяется более равномерно по всему спектру, автокорреляционная функция (АКФ) приобретает затухающий характер, усиливается чувствительность к начальным условиям. Так, на рис. 2.18 представлены результаты обработки сигналов координат ( $x_j$ ) и скоростей ( $v_j$ ) для последнего в линейной цепочке груза трехмассовой полностью связанной системы пружинных маятников (рис. 2.16) без нелинейности (рисунки в левой колонке) и с нелинейно изменяющейся жесткостью  $c_{03}$  (рисунки в правой колонке).

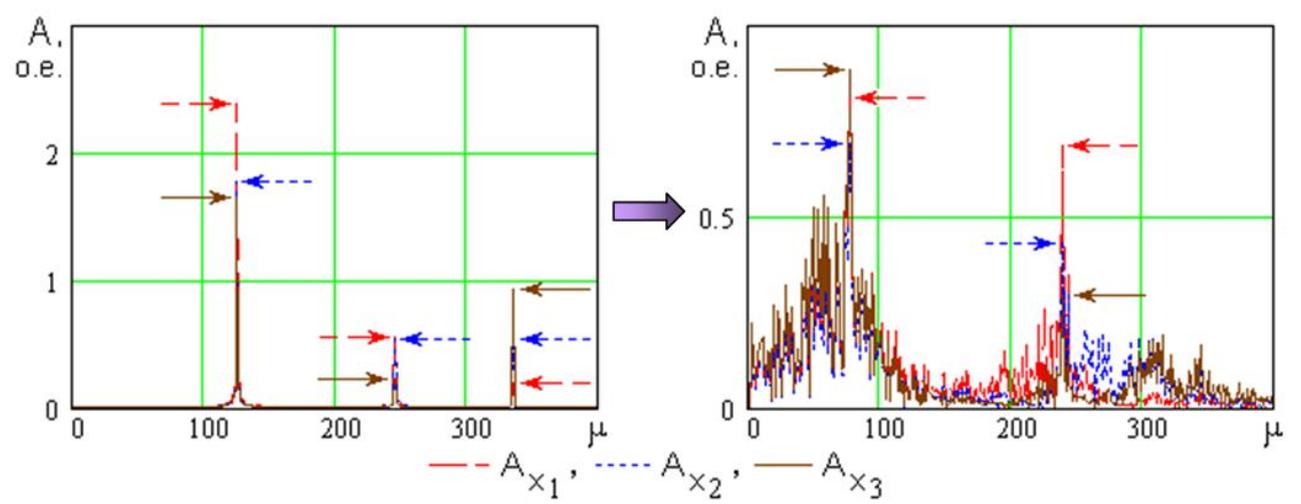
На рис. 2.18, а приведены автокорреляционные функции сигналов изменения координаты центра массы груза  $m_3$  во времени (последнего груза в цепочке и, в то же время, груза, который непосредственно соединен с нелинейным элементом), где  $\mu$  – номер точки АКФ.

Видно, что введение дополнительной нелинейности придает автокорреляционной функции затухающий характер, таким образом, развитие процесса во времени проходит существенно аперiodически. На рис. 2.18, б стрелками обозначены амплитуды пиков спектрограмм сигналов координат центров масс системы;  $\mu$  – номер точки дискретного преобразования Фурье. Введение дополнительной нелинейности приводит к расширению частотного состава сигнала и значительному затуханию доминирующих гармоник.

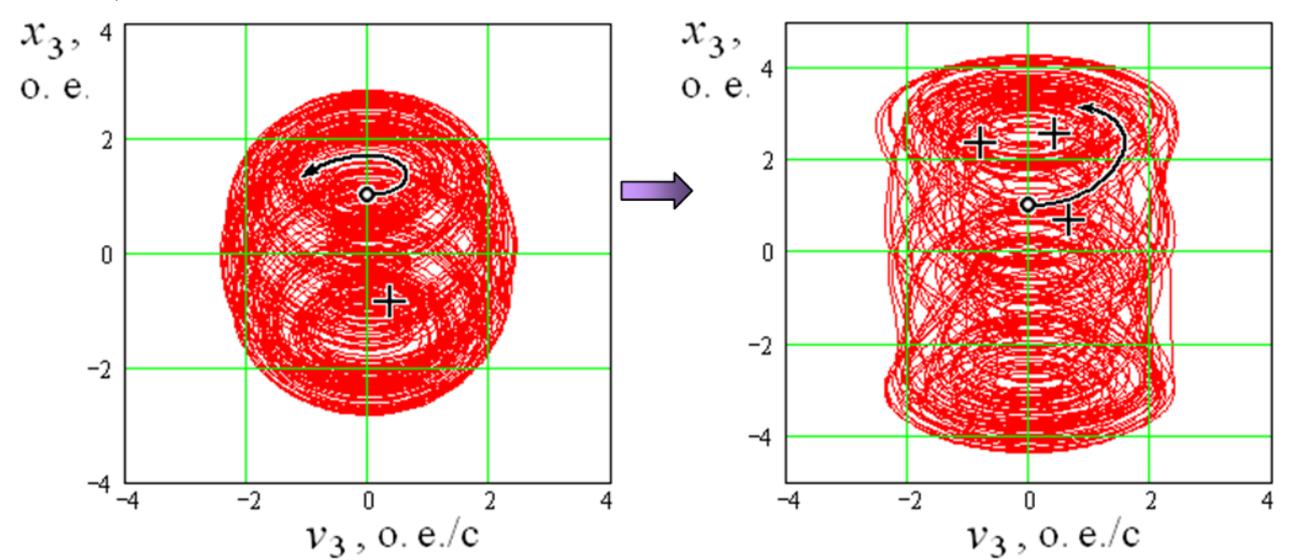
На рис. 2.18, в знаком « $\circ \rightarrow$ » обозначены начальная точка и направление движения груза  $m_3$  вдоль фазовой траектории  $x_3 = f(v_3)$ . Знаком «+» обозначены конечные точки траектории при малом изменении начальных условий (координата  $x_3^0$  изменялась  $\pm 1\%$ ).



а)



б)



в)

Рисунок 2.18 – Хаотизация полностью связной системы из трех пружинных маятников введением дополнительной нелинейности: а) графики автокорреляционных функций; б) спектрограммы; в) траектории

И если в системе без дополнительной нелинейности такое изменение было несущественным, то при наличии нелинейного элемента изменение начальной координаты приводило не только к значительному изменению конечного положения груза (см. знаки «+»), но и к изменению самой траектории с сохранением «зоны притяжения», т. е. аттрактора, рис. 2.18, в.

Известные исследования областей возбуждения субгармонических и хаотических колебаний, выполненные на эквивалентных моделях реальных электрических схем, показали, что механизмом перехода к сложным неупорядоченным хаотическим колебаниям является механизм перекрытия резонансов – биения [49]. При этом в спектре субгармонических колебаний наблюдаются вторая и третья гармоники. Наши исследования показывают не только на изменения величин резонансных амплитуд при увеличении степени хаотизации системы, но и на «смазывание» частотных характеристик системы.

Таким образом, в открытых неравновесных системах, обладающих нелинейностью, всегда возможны флуктуации, способные привести к образованию новых типов структур и функциональных связей, при этом эволюция структуры определяется последовательностью событий в соответствии со схемой: функция – структура – флуктуация – функция; функция – флуктуация – структура – функция [79]. Эта эволюция систем подтверждается как результатами математического моделирования (рис. 2.15), так и результатами обширных экспериментальных исследований [84].

## 2.4 Выводы по разделу

С целью изучения явления динамического хаоса с помощью Mathcad апробированы генераторы хаоса, полученные на основе систем уравнений Лоренца и Ресслера, отображений Хенона и Икеды, функции Вейерштрасса – Мандельброта, уравнения Меки – Гласса, а также двухмерный и трехмерный генераторы Ван дер Поля, генераторы на основе логистического отображения и несимметричного TENT-отображения. Предложена методика моделирования влияния хаотических процессов на реальные горные технические системы с помощью генератора динамического хаоса.

Для определения допустимой погрешности итераций и порядка вычислений величин угловых ускорений эксцентрически смещенных масс внутри одной итерации на поведение динамических систем

---

впервые выполнено методами аналитической механики математическое моделирование материальной системы, состоящей из трех связанных идеальных математических маятников, причем дополнительно рассмотрен вариант, в котором первый маятник жестко соединен с маховиком. Определены параметры и критерии определения допустимой погрешности итераций для математического моделирования динамических процессов в горных технических системах.

Одним из необходимых условий адекватности программной модели механической или электромеханической системы с эксцентрически неуравновешенными вращающимися относительно нефиксированных центров массами является достоверное определение координат центров вращения и векторов мгновенной скорости, в частности методом итерационных приближений. Порядок вычисления внутри одной итерации взаимозависимых угловых ускорений эксцентрически неуравновешенных масс для системы, проявляющей себя как генератор динамического хаоса, существенно влияет на численные значения текущих координат центров этих масс в каждый последующий момент времени после прохождения ближайшей области локальной неустойчивости, однако не изменяет качественно характер протекающих процессов и общие энергетические характеристики модели.

Траектории центров масс системы трех связанных маятников даже в приложении к плоской задаче образуют сложные фигуры, имеющие фрактальный характер, которые могут рассматриваться как гладкие отображения поверхностей на плоскость, имеющие складки и сборки. Следовательно, движение таких систем можно анализировать с точки зрения теории катастроф для выявления (а в технических приложениях – для прогнозирования и предупреждения) скачкообразных изменений, возникающих в виде внезапных ответов на плавное изменение условий (в технических приложениях – постепенный износ деталей, плавное увеличение нагрузок, нарушение температурных режимов, ухудшение параметров изоляции, плавное насыщение магнитных систем и др. факторы по отдельности и в комплексе).

Рассмотрены возможности математического моделирования на основе  $k$ -массовых систем простых и полносвязанных пружинных маятников без и с введением дополнительной нелинейности для оценки динамического состояния реальных горных технических систем, в частности динамической системы «горный технический объект – породный массив», для прогнозирования устойчивости такой системы и вероятности возникновения в ней хаотических и синергетических процессов.

---

## **3 ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СРЕДСТВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

---

### **3.1 Обоснование параметров генератора динамического хаоса, реализующего систему уравнений Лоренца**

Для изучения устойчивости реальных элементов геомеханических объектов, например, элементов рамно-анкерной крепи, их моделей к возможным динамическим воздействиям, в том числе и хаотическим, натурального и полунатурного моделирования обоснованы параметры генератора сигналов детерминированного хаоса (ГДХ). Одно из возможных применений данного генератора – формирование сигналов с заданными параметрами и ввод их по трем координатам в геотехническую систему как возмущающих воздействий или как сигналов изменяющейся нагрузки. При этом можно исследовать реакцию системы на эти хаотические воздействия, характер протекания технологических процессов, устойчивость и надежность системы. Данный вид моделирования является актуальным, так как технологические установки в шахтных условиях функционируют как динамические системы с элементами стохастического или детерминированного хаоса (геомеханические системы; буровые установки; движение жидкости или пульпы в трубопроводах в режиме турбулентности). При этом подобрать известную или разработать новую адекватную математическую модель удастся не всегда [50, 119].

Сигнал ГДХ можно использовать как сигнал типового воздействия, подавая его на вход какого-либо объекта с целью идентификации элементов системы и оценки их устойчивости. При этом возможно использование известных методов идентификации (сравнение амплитудно-частотных характеристик входного и выходного сигналов и фазового сдвига выходного сигнала относительно входного, определение полосы пропускания и динамического диапазона, оценка линейности объекта, оценка устойчивости системы при различных параметрах входного сигнала, оценка энергетических характеристик объекта, определение потерь в различных частотных полосах и др.). Также перспективным направлением представляется разработка новых методов идентификации, учитывающих такие особенности сигнала ГДХ как равномерность распределения энергии сигнала по частотной полосе,

---

быстро спадающую автокорреляционную функцию (АКФ) и строгую детерминированность.

Возможны следующие способы реализации генераторов динамического хаоса: аналоговые, дискретные и цифровые модели аналоговых ГДХ с численным решением систем дифференциальных уравнений. В некоторых случаях могут использоваться исключительно аналоговые генераторы, например в приложениях связи и кодирования данных высокой категории защищенности. Однако сигнал аналогового генератора строго определяется его структурой и номиналами составляющих элементов, поэтому аналоговые генераторы трудно перенастраивать. В то же время для решения задач, перечисленных выше, необходимы гибкие генераторы, обеспечивающие возможность быстрой перенастройки и изменения параметров генерируемых сигналов в широких пределах. Поэтому принято решение разработки и построения цифрового генератора.

Построение цифрового генератора возможно: на основе персонального компьютера (ПК) со встроенной платой многоканального цифро-аналогового преобразователя (ЦАП); на основе персонального компьютера и внешней платы контроллера с ЦАП; на основе одноплатной микропроцессорной мини- или микро-ЭВМ. Разработка генератора динамического хаоса по первому указанному варианту в принципе является инженерной задачей, основной объем работ по выполнению которой заключается в алгоритмизации численных методов решения системы дифференциальных уравнений и составлении программы на языке высокого уровня. Лишь для самых «критичных» участков программы может потребоваться программирование на ассемблере (например, для написания драйверов многоканального ЦАП) [90, 95, 114].

Наиболее сложным вариантом является разработка и реализация генератора динамического хаоса на основе микропроцессорной системы с ограниченными вычислительными возможностями и аппаратными ресурсами (например, на основе одноплатной мини-ЭВМ с однокристальным микроконтроллером или с цифровым сигнальным процессором). В то же время данный вариант представляет наибольший интерес, т. к. позволяет получить компактное полностью автономное недорогое устройство, не требующее лицензионного системного программного обеспечения. А опыт, полученный при разработке такого устройства, может быть

полезен в дальнейшем многим проектантам, работающим в области создания компактных высокотехнологичных устройств, например, цифровых измерительных приборов, диагностических комплексов, систем управления и т. п. Таким образом, в дальнейшем рассматривается разработка генератора сигналов динамического хаоса на основе одноплатной мини-ЭВМ [8, 90, 95].

Процесс разработки ГДХ включает в себя как стандартные этапы проектирования микропроцессорного устройства (выбор архитектуры и элементной базы, разработка схемотехнической реализации устройства, проектирование печатной платы и конструкторские работы, а также работы по программированию и отладке), которые выполнены на кафедре электропривода НГУ [132], так и исследовательские элементы (рис. 3.1): 1) выбор системы уравнений, описывающих ГДХ; 2) определение диапазонов изменения параметров, в пределах которых система проявляет себя как хаотическая; 3) выбор конкретных значений параметров для реализации; 4) спектральный и корреляционный анализ выходных сигналов при заданных параметрах с целью определения качества; 5) определение амплитудных диапазонов изменения как выходных величин, так и всех отдельных компонентов уравнений при различном сочетании слагаемых; 6) выбор формата представления чисел, охватывающего максимальный из требуемых диапазонов и обеспечивающего требуемую точность; 7) составление рациональной вычислительной схемы решения уравнений; 8) алгоритмизация вычислительной схемы.

После этого выполняется программирование, отладка и оптимизация программы. Следует отметить, что приведенная выше схема не является строго линейной, т. к. выполнение любого из этапов может привести к необходимости повтора предыдущего или нескольких предыдущих (например, изменение сочетания слагаемых в вычислительной схеме может привести к изменению амплитудного диапазона компонент уравнения, что может потребовать нового формата представления чисел, а это в свою очередь скажется на точности вычислений).

В дальнейшем будет рассмотрена разработка генератора динамического хаоса, описываемого системой уравнений Лоренца.

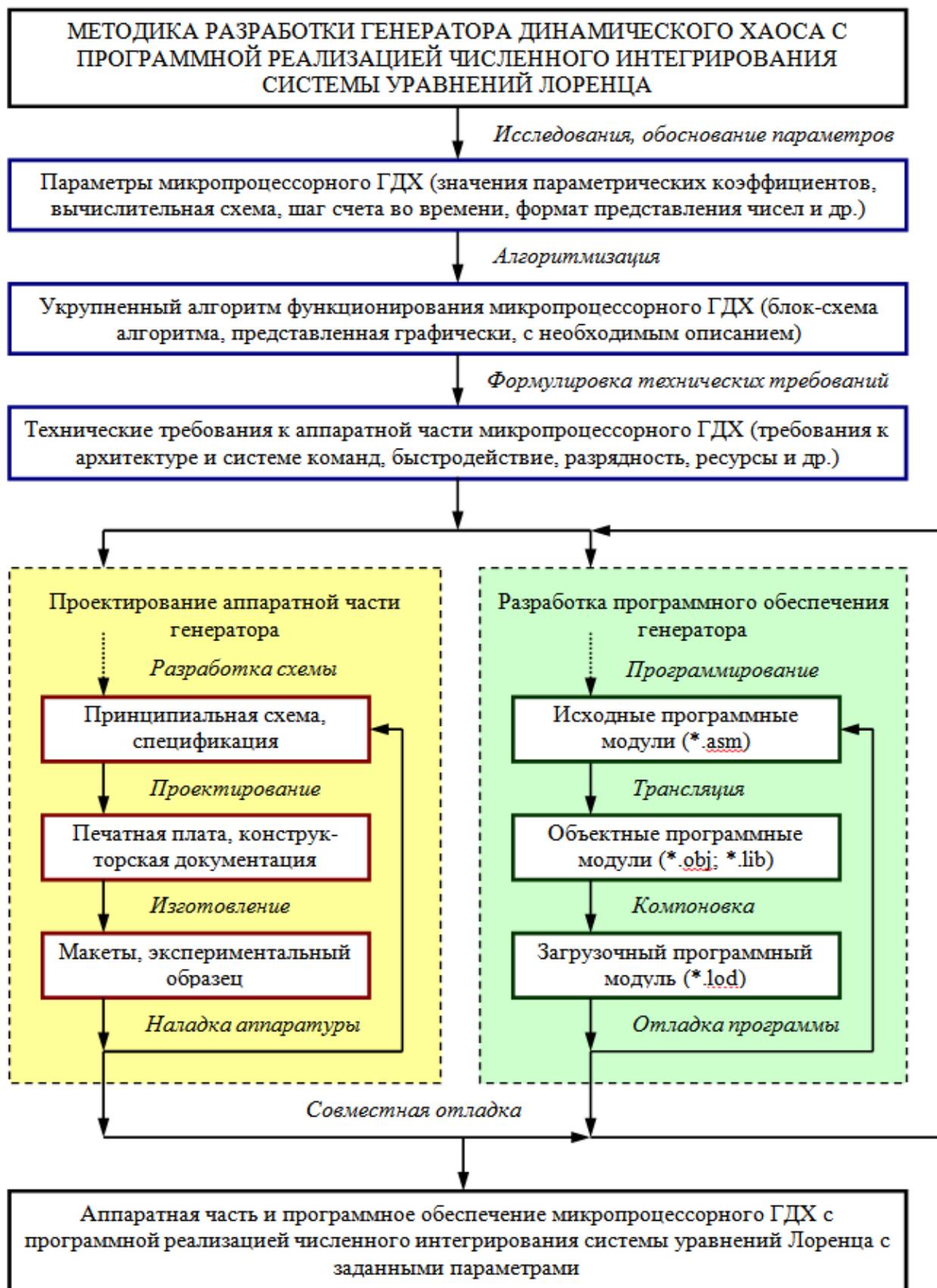


Рисунок 3.1 – Этапы разработки микропроцессорного генератора сигналов динамического хаоса

Данная система является классической, трехмерной, обеспечивает двухпетлевой аттрактор и хорошие спектральные свойства в широком диапазоне изменения параметров. Система дифференциальных уравнений Лоренца [117]

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} x(t) = -\sigma x(t) + \sigma y(t), \\ \frac{d}{dt} y(t) = -x(t)z(t) + rx(t) - y(t), \\ \frac{d}{dt} z(t) = x(t)y(t) - bz(t) \end{cases} \quad (3.1)$$

задает изменение во времени трех переменных  $x(t)$ ,  $y(t)$  и  $z(t)$ , динамика системы определяется параметрическими коэффициентами  $\sigma$ ,  $r$  и  $b$ .

Для обеспечения максимального быстродействия генератора программирование выполнено полностью на ассемблере. В качестве одного из способов оптимизации выполнения программы по времени вычисления предложен выбор параметрических коэффициентов-множителей кратный двум с заменой операций умножения и деления линейными сдвигами. Методика такого выбора коэффициентов отсутствует, поэтому предложено исследовать работу генератора при различных комбинациях коэффициентов математическим моделированием в оболочке Mathcad [42].

Для создания модели запишем систему Лоренца уравнениями в конечных приращениях  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  по выходным координатам:

$$\begin{cases} \frac{\Delta x_i}{\Delta t} = \sigma(y_{i-1} - x_{i-1}), \\ \frac{\Delta y_i}{\Delta t} = -x_{i-1}z_{i-1} + rx_{i-1} - y_{i-1}, \\ \frac{\Delta z_i}{\Delta t} = x_{i-1}y_{i-1} - bz_{i-1} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Delta x_i = \sigma(y_{i-1} - x_{i-1})\Delta t, \\ \Delta y_i = (-x_{i-1}z_{i-1} + rx_{i-1} - y_{i-1})\Delta t, \\ \Delta z_i = (x_{i-1}y_{i-1} - bz_{i-1})\Delta t \end{cases} \quad (3.2)$$

где  $i$  – номер текущей точки;  $\Delta t$  – конечное приращение по времени, рис. 3.2.

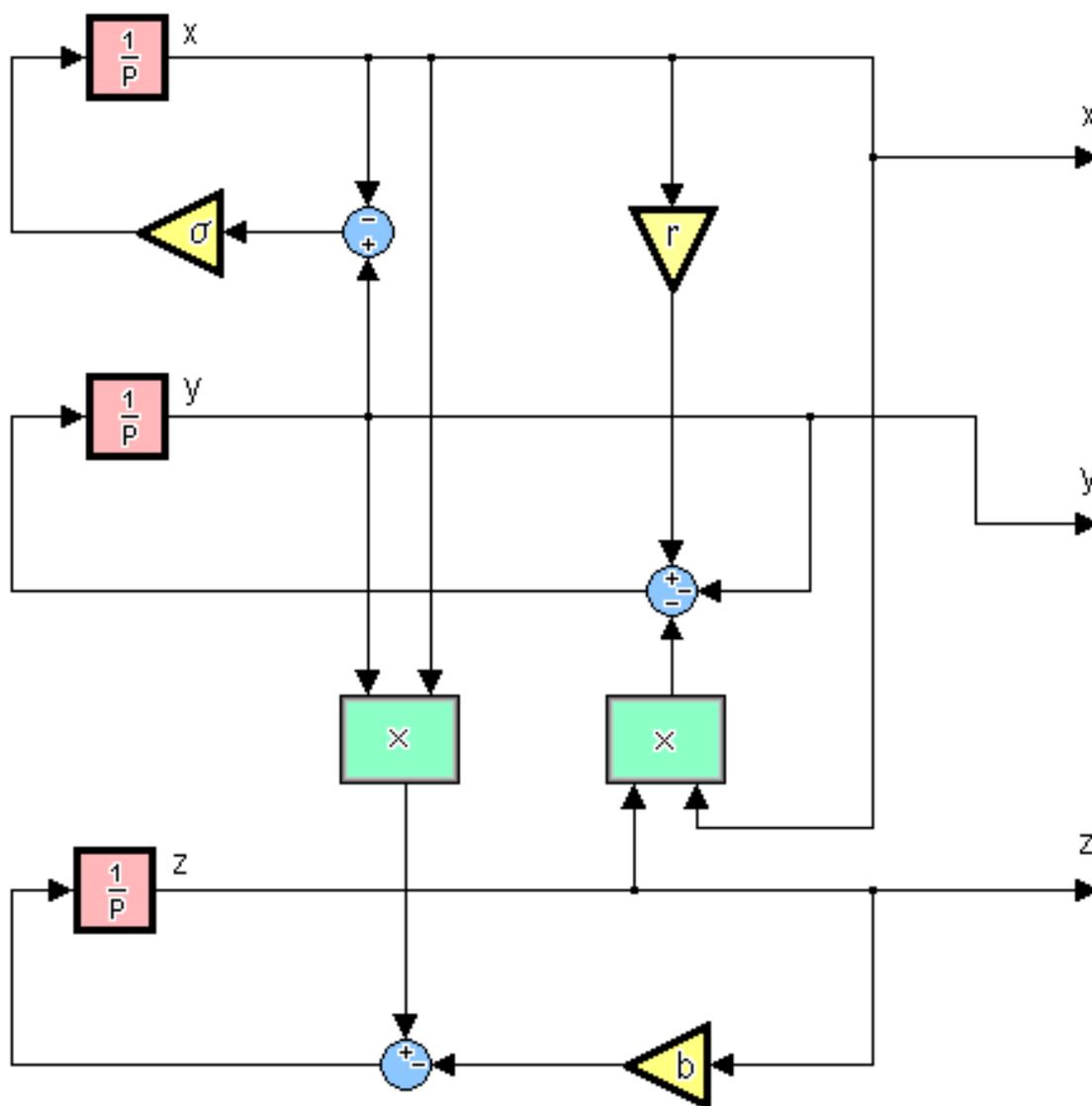


Рисунок 3.2 – Структурная схема генератора хаотических сигналов, реализующего систему уравнений Лоренца (на рисунке обозначены:  $1/p$  – интегрирующее звено, « $\times$ » – блок умножения,  $\sigma$ ,  $r$  и  $b$  – параметрические коэффициенты)

Численное интегрирование системы выполняется в программном блоке, оформленном в виде функции пользователя с передачей параметров в тело программного блока из основного электронного листа Mathcad. Это позволяет многократно вызывать данную функцию с подстановкой конкретных значений формальных параметров при моделировании различных режимов работы генератора:

$$\text{Lorenz}(x, y, z, \sigma, r, b, h, n) := \left( \begin{array}{l} x_0 \leftarrow x \quad y_0 \leftarrow y \quad z_0 \leftarrow z \\ \text{for } i \in 1..n \\ \quad \left[ \begin{array}{l} dx_i \leftarrow \sigma \cdot (y_{i-1} - x_{i-1}) \cdot h \quad x_i \leftarrow x_{i-1} + dx_i \\ dy_i \leftarrow (-x_{i-1} \cdot z_{i-1} + r \cdot x_{i-1} - y_{i-1}) \cdot h \quad y_i \leftarrow y_{i-1} + dy_i \\ dz_i \leftarrow (x_{i-1} \cdot y_{i-1} - b \cdot z_{i-1}) \cdot h \quad z_i \leftarrow z_{i-1} + dz_i \end{array} \right] \\ \quad sm1_i \leftarrow -x_{i-1} \cdot z_{i-1} \\ \quad sm2_i \leftarrow -x_{i-1} \cdot z_{i-1} - y_{i-1} \\ \quad sm3_i \leftarrow -x_{i-1} \cdot z_{i-1} + r \cdot x_{i-1} \\ \quad sm4_i \leftarrow -x_{i-1} \cdot z_{i-1} + r \cdot x_{i-1} - y_{i-1} \\ \quad sm5_i \leftarrow x_{i-1} \cdot y_{i-1} \\ \quad sm6_i \leftarrow x_{i-1} \cdot y_{i-1} - b \cdot z_{i-1} \\ \text{augment} \left( \frac{dx}{h}, x, \frac{dy}{h}, y, \frac{dz}{h}, z, sm1, sm2, sm3, sm4, sm5, sm6 \right), \end{array} \right),$$

где  $h = \Delta t$  – шаг интегрирования по времени;  $n$  – количество расчетных точек;  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  – конечные приращения по выходным координатам;  $sm1$ ,  $sm2$ , ...,  $sm6$  – элементы выражений для приращений функций при различном сочетании слагаемых; *augment* – оператор объединения векторов мгновенных значений переменных.

В литературе в качестве примера приводятся следующие значения параметрических коэффициентов, обеспечивающие хаотический режим работы генератора:  $\sigma = 10$ ;  $r = 28$ ;  $b = 8/3 = 2,6$ . Как показывает моделирование, при таких значениях коэффициентов и достаточно малом шаге интегрирования система совершает нерасходящиеся хаотические колебания и даже при сколь угодно большом числе точек выходные координаты лежат в пределах  $x \in (-25, 25)$ ,  $y \in (-30, 30)$ ,  $z \in (0, 60)$  в округлении до ближайшего целого, кратного пяти. Таким образом, нет принципиальных ограничений для реализации такого генератора на основе аппаратной платформы мини-ЭВМ. Однако из уравнений в конечных разностях (3.2) и листинга программного блока модели видно, что расчеты предусматривают вычисление нескольких арифметических произведений. Определяются произведения мгновенных значений двух выходных координат, например  $x_{i-1} \times y_{i-1}$ ; произведения мгновенного значения координаты на параметрический коэффициент, например  $r \times x_{i-1}$ ; произведения тангенса угла наклона касательной к

---

графику интегрируемой функции в расчетной точке на значение шага интегрирования, например  $[\sigma(y_{i-1} - x_{i-1})] \times h$ . При реализации генератора с помощью микропроцессорных средств наиболее длительными в вычислительном цикле являются операции умножения и деления даже в том случае, когда используется целочисленная арифметика над операндами низкой разрядности и арифметико-логическое устройство микропроцессора или микроконтроллера (МК) имеет аппаратные множитель и делитель (например, система команд микроконтроллера семейства MCS-51/52 содержит команды умножения MUL и деления DIV, в отличие от большинства микроконтроллеров с RISC-архитектурой). Поэтому для увеличения быстродействия (а, следовательно, для обеспечения возможности вычислений с меньшим шагом счета и большей точностью) следует по возможности сократить число произведений в вычислительной схеме. Этого можно добиться следующими способами: 1) упрощением выражений; 2) группировкой слагаемых и выносом множителей за скобки; 3) предварительным умножением заранее известных множителей до программирования на этапе алгоритмизации; 4) заменой арифметического умножения на заранее предустановленный множитель, кратный двум, логическим сдвигом операнда, представленного в двоичном коде, влево; число сдвигов равно степени кратности; 5) заменой арифметического деления на множитель, кратный двум, логическим сдвигом вправо; число сдвигов равно степени кратности.

Очевидно, что имеется область значений коэффициентов, в пределах которой система проявляет себя как хаотическая. Задача поиска коэффициентов, кратных двум, принадлежащих этой области, решается следующим образом. Составляется трехмерная комбинационная таблица – описание координатной системы, по трем осям которой в первом квадранте откладываются кратные двум значения коэффициентов  $\sigma$ ,  $r$  и  $b$  в пределах от 0 до значений, соответствующих жесткой потере устойчивости с расхождением функции (расхождение детектируется по переполнению при выполнении вычислений). Далее вызывается функция  $Lorenz(x, y, z, \sigma, r, b, h, n)$  с подстановкой параметрических коэффициентов из комбинационной таблицы. Полученные графики (рис. 3.3) анализируются визуально, определяются спектральные и

автокорреляционные характеристики выходных координат (табл. 3.1) и выбираются значения коэффициентов для реализации генератора.

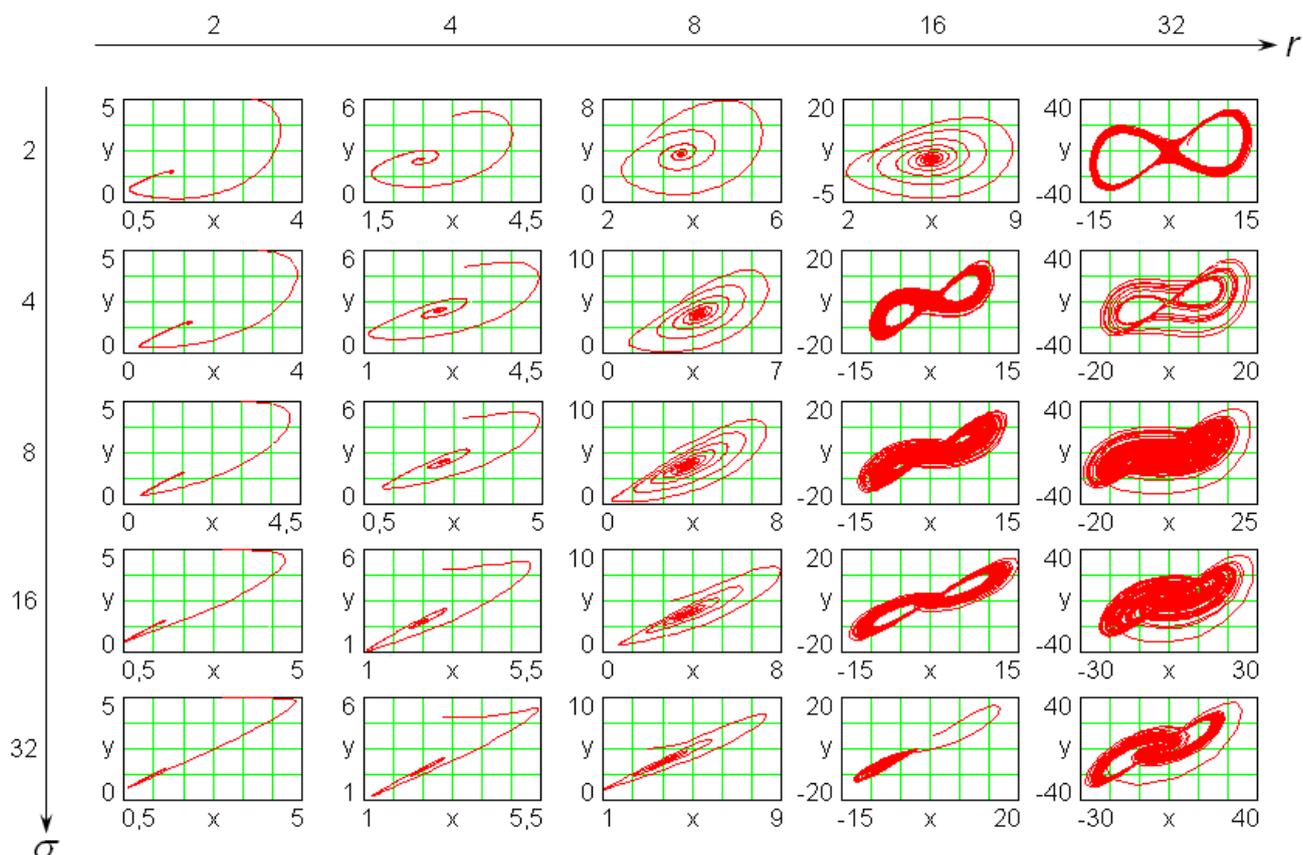


Рисунок 3.3 – Влияние величин параметрических коэффициентов  $r$  и  $\sigma$  на вид и форму аттрактора ( $b = 2$ ,  $h = 1/64$ ,  $n = 10000$ ). В верхнем левом углу графиков – размерность аттрактора  $\dim_L K$ , о. е.

Рассмотрим плоский срез трехмерной комбинационной таблицы параметрических коэффициентов, соответствующий фиксированному значению параметра  $b = 2$ . Из рис. 3.3 видно, что при  $r < 16$ , независимо от значения параметрического коэффициента  $\sigma$ , система описывает сходящуюся в точку траекторию, т.е. имеет место затухающий колебательный процесс. То же можно отметить и для следующих пар коэффициентов:  $(r = 16, \sigma = 2)$ ,  $(r = 16, \sigma = 32)$ , причем в последнем случае система находится вблизи бифуркации (исходная точка траектории при заданных начальных условиях лежит в области притяжения одной петли, но затем система переходит в область притяжения конечной точки, спиралевидное движение к которой образует вторую петлю; очевидно, что незначительное изменение параметров в сторону увеличения  $r$  и (или) в сторону уменьшения  $\sigma$  приведет к изменению динамического поведения системы с появлением двухпетлевого аттрактора, т. е. к бифуркации).

Таблица 3.1 – Параметры модели генератора, статистические данные сигналов и их функций автокорреляции

№ п/п	Параметрические коэфф., о.е.		Ссылка на рисунок	Вид процесса, форма аттрактора	Начальный момент первого порядка, о.е.			Дисперсия смещенная, о.е.			
	$\sigma$	$r$			$b$	$M_x$	$M_y$	$M_z$	$D_x$	$D_y$	$D_z$
1	2	3	4	5	б	7	8	9	10	11	12
1	2	16	2	Рис. 3.3	Затухающий	5.48	5.48	14.99	0.01	0.09	0.13
2	2	32	2	Рис. 3.3	Хаотич., двухпетлевой	-0.06	-0.06	19.04	40.51	190.53	236.72
3	4	16	1	-	Хаотич., двухпетлевой	-0.18	-0.18	13.87	13.99	18.15	14.99
4	4	16	2	Рис. 3.3,	Хаотич., двухпетлевой	0.11	0.11	11.67	23.80	38.03	39.27
5	4	32	2	Рис. 3.3,	Хаотич., двухпетлевой	8.47E-03	4.43E-03	27.27	57.36	141.67	124.05
6	4	32	4	-	Хаотич., одна петля	3.18E-04	2.88E-04	22.05	94.41	280.74	258.08
7	8	16	2	Рис. 3.3	Хаотич., двухпетлевой	-0.06	-0.06	13.14	26.67	31.91	28.59
8	8	32	2	Рис. 3.3,	Хаотич., двухпетлевой	0.01	0.01	29.63	61.14	86.90	69.05
9	8	32	4	-	Хаотич., двухпетлевой	5.07E-03	5.66E-03	26.81	113.89	206.98	182.86
10	10	28	2.67	Рис. 3.4	Хаотич., двухпетлевой	-0.09	-0.09	25.58	69.86	87.53	59.52
11	16	16	2	Рис. 3.3	Хаотич., двухпетлевой	-0.14	-0.14	12.76	25.88	28.07	37.41
12	16	32	2	Рис. 3.3	Хаотич., двухпетлевой	-0.13	-0.13	29.45	61.30	75.66	109.43
13	16	32	4	-	Хаотич., двухпетлевой	-0.04	-0.04	29.42	121.73	146.05	104.63
14	16	32	8	-	Хаотич., двухпетлевой	0.06	0.06	26.78	226.81	302.21	217.34
15	32	16	2	Рис. 3.3	Затухающий периодический вблизи	-5.45	-5.46	14.99	0.24	0.24	0.39
16	32	32	2	Рис. 3.3, 3.5	Хаотич., двухпетлевой	-0.01	-0.01	28.77	60.38	66.04	187.43

Продолжение таблицы 3.1

№ п/п	Среднеквадратическое отклонение, о.е.			Кoeff. асимметрии графика закона распределения значений АКФ, о.е.			Кoeff. эксцесса графика закона распределения значений АКФ, о.е.			Смещение первого пересечения АКФ с осью абсцисс, о.е.		
	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_z$	$As_x$	$As_y$	$As_z$	$Ex_x$	$Ex_y$	$Ex_z$	$Nr_x$	$Nr_y$	$Nr_z$
1	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	0.11	0.30	0.36	2.81	1.65	4.59	93.33	88.20	96.26	19.60	18.26	18.26
2	6.36	13.80	15.39	12.69	15.18	0.21	236.22	390.89	-1.22	45.87	18.26	17.01
3	3.74	4.26	3.87	5.69	7.04	0.85	56.52	88.48	12.63	727.01	727.01	27.94
4	4.88	6.17	6.27	13.00	15.42	0.10	226.93	327.12	-1.40	56.73	47.53	21.04
5	7.57	11.90	11.14	-6.22E-04	3.20E-04	1.30	-0.15	-0.54	0.48	25.12	19.60	13.76
6	9.72	16.76	16.06	-2.11E-03	-8.34E-04	0.33	-1.31	-0.27	-1.39	22.59	18.92	10.36
7	5.16	5.65	5.35	13.53	14.79	0.11	246.28	298.03	-0.81	67.73	60.90	18.92
8	7.82	9.32	8.31	15.97	18.99	5.82	357.25	501.77	171.26	38.43	33.35	13.76
9	10.67	14.39	13.52	0.11	0.23	1.54	6.01	8.47	14.81	16.42	13.28	10.36
10	8.36	9.36	7.71	14.93	17.12	4.59	311.06	412.69	141.06	107.34	103.61	12.37
11	5.09	5.30	6.12	10.64	11.05	0.20	224.87	244.40	2.53	45.87	45.39	18.26
12	7.83	8.70	10.46	5.07	6.21	3.49	147.78	193.94	128.78	25.12	26.96	14.25
13	11.03	12.08	10.23	18.51	20.38	4.90	486.33	592.79	192.14	27.94	26.96	9.32
14	15.06	17.38	14.74	6.76	8.30	2.65	191.00	246.27	75.83	12.37	11.12	6.77
15	0.48	0.49	0.62	10.07	10.20	5.38	153.61	159.21	150.31	21.04	20.31	15.85
16	7.77	8.13	13.69	19.00	19.87	0.78	537.63	588.71	11.45	86.79	85.27	14.25

Продолжение таблицы 3.1

№ п/п	Суммы 5-ти (3-х) максимальных пиков АКФ,							Коэфф. затухания АКФ по			Особенности траектории	Особенности АКФ	Реализация
	$S_{5x}$	$S_{3x}$	$S_{5y}$	$S_{3y}$	$S_{5z}$	$S_{3z}$	$k_{Sx}$	$k_{Sy}$	$k_{Sz}$				
1	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
1	2,409	1,725	2,509	1,798	2,245	1,561	1,193	1,194	1,159	Прим. 1.1	Прим. 2.1	Не удовлетворяет требованиям	
2	0,477	0,305	0,617	0,461	2,949	1,779	1,066	1,245	1,005	Прим. 1.2	Прим. 2.2	Не рекомендован	
3	0,477	0,344	0,422	0,297	2,13	1,397	1,202	1,173	1,093	Прим. 1.3	Прим. 2.3	Не рекомендован	
4	0,383	0,234	0,391	0,266	2,708	1,656	1,018	1,134	1,019	Прим. 1.4	Прим. 2.4	Реализован	
5	5	3	5	3	5	3	1	1	1	Прим. 1.5	Прим. 2.5	Не удовлетворяет требованиям	
6	5	3	5	3	5	3	1	1	1	Прим. 1.6	Прим. 2.6	Не удовлетворяет требованиям	
7	0,297	0,188	0,281	0,18	2,467	1,561	1,055	1,068	1,055	Прим. 1.7	Прим. 2.7	Не рекомендован	
8	0,328	0,211	0,297	0,195	1,094	0,789	1,072	1,094	1,202	Прим. 1.8	Прим. 2.8	Реализован	
9	3,566	2,236	3,038	1,917	2,578	1,648	1,045	1,052	1,065	Прим. 1.9	Прим. 2.9	Не рекомендован	
10	0,266	0,164	0,242	0,164	1,497	1,023	1,028	1,129	1,139	Прим. 1.10	Прим. 2.10	Исходные параметры	
11	0,758	0,578	0,766	0,578	3,328	2,061	1,271	1,258	1,032	Прим. 1.11	Прим. 2.11	Не рекомендован	
12	1,344	1,102	1,211	0,992	1,725	1,197	1,367	1,365	1,157	Прим. 1.12	Прим. 2.12	Не рекомендован	
13	0,266	0,164	0,25	0,164	1,665	1,142	1,028	1,093	1,143	Прим. 1.13	Прим. 2.13	Не рекомендован	
14	1,375	1,008	1,258	0,93	2,017	1,292	1,222	1,232	1,068	Прим. 1.14	Прим. 2.14	Рекомендован	
15	1,383	0,984	1,352	0,969	1,839	1,452	1,186	1,195	1,316	Прим. 1.15	Прим. 2.15	Не удовлетворяет требованиям	
16	0,695	0,586	0,695	0,586	3,656	2,267	1,405	1,405	1,033	Прим. 1.16	Прим. 2.16	Не рекомендован	

Следующие пары коэффициентов  $(r, \sigma) = \{(16, 4), (16, 8), (16, 16); (32, 2), (32, 4), (32, 8), (32, 16), (32, 32)\}$  обеспечивают двухпетлевой аттрактор в фазовых плоскостях выходных координат (рис. 3.3). С целью выбора конкретных параметров для реализации в микропроцессорном устройстве рассмотрим автокорреляционные функции сигналов генератора и их статистические характеристики (рис. 3.4, табл. 3.1). Выходные сигналы генератора являются псевдослучайными и могут быть использованы для добавления шумов в каналы технического устройства. Поэтому важными являются статистические параметры, определяемые обычно для выборок, каждая из которых соответствует одним (одинаковым) условиям измерений, а именно: средние арифметическое и геометрическое значения по выборке, центральные и начальные моменты, смещенные дисперсия и среднеквадратическое отклонение и др. Для сигналов  $x$  и  $y$  средние арифметические значения стремятся к нулю при увеличении числа точек, поэтому величины отклонения этих значений от нуля для достаточно большой выборки (колонки 7, 8 табл. 3.1) являются одним из критериев работоспособности ГДХ и качества генерируемых сигналов. В частности, в случае затухающих периодических колебаний можно наблюдать, что средние значения приближаются к величинам, значительно отличным от нуля (строки 1, 15 табл. 3.1), а именно к установившимся значениям по соответствующим координатам. В остальных случаях отклонение среднего арифметического от нуля не превышает 2 % от диапазона изменения соответствующего сигнала по амплитуде (размаха сигнала). Однако данный критерий не является достаточным при определении параметров ГДХ, хотя и позволяет автоматически отсеивать заведомо непригодные варианты. Например, с помощью данного критерия невозможно выявить комбинации параметров, при которых ГДХ генерирует незатухающий апериодический сигнал с неудовлетворительной АКФ (строки 5, 6 табл. 3.1).

Отметим также, что дисперсии  $D_x$ ,  $D_y$  и  $D_z$  (колонки 10-12 табл. 3.1) и среднеквадратические отклонения  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и  $\sigma_z$  (колонки 13-15 табл. 3.1) в случае затухающих колебаний при увеличении числа точек стремятся к нулю.

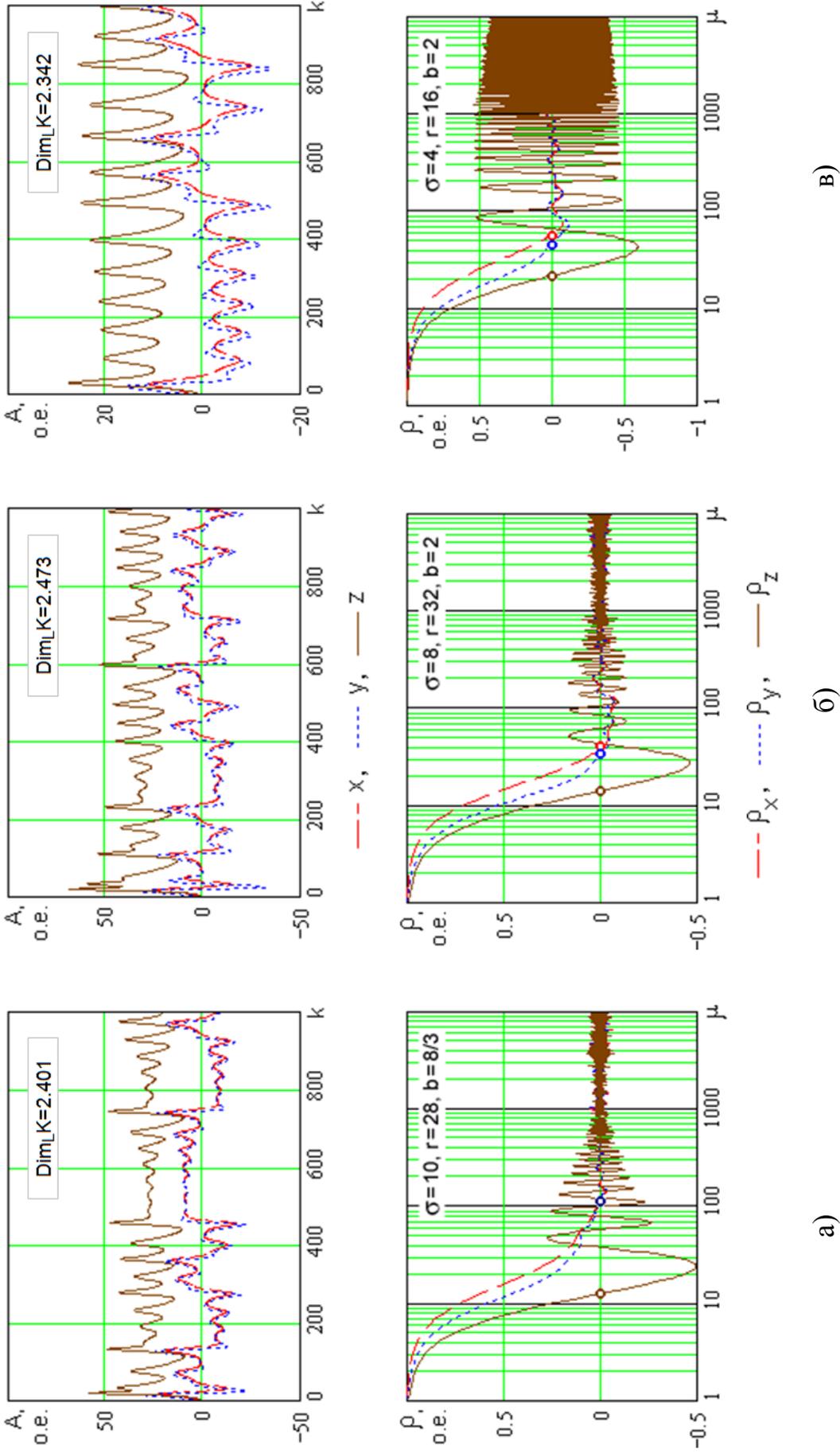


Рисунок 3.4 – Осциллограммы сигналов (вверху) и их автокорреляционные функции (внизу): а) модель с исходными параметрическими коэффициентами; б, в) реализованные модели с коэффициентами из ряда  $2^k$

Это объясняется распределением отклонений сигнала от среднего значения, имеющих место только в начальных точках траектории, когда характер процесса еще колебательный, на все большее число точек выборки, зафиксированных уже при установившемся состоянии генератора.

Начальный момент первого порядка по координате  $z$  (колонка 9 табл. 3.1) при увеличении числа точек не стремится ни к нулю, ни к середине амплитудного диапазона, и данная характеристика сигнала может быть интересна с точки зрения использования разработанного ГДХ, но не может являться критерием для выбора его параметров.

Не менее важными, а в некоторых случаях определяющими, являются параметры автокорреляционной функции и спектра сигнала, подтверждающие либо опровергающие «апериодичность» и «случайность» незатухающего сигнала. Так, автокорреляционная функция должна быть быстро спадающей без вторичных пиков значительной амплитуды (идеальной формой АКФ можно считать импульс единичной амплитуды и нулевой длительности в точке, соответствующей нулевому сдвигу). Ограничившись лишь визуальной качественной оценкой графиков АКФ, мы снизили бы универсальность предлагаемой методики и исключили бы возможность автоматизации процесса выбора параметрических коэффициентов. В этой связи, а также для исключения субъективизма в оценке, введем числовые показатели качества АКФ:

– коэффициент асимметрии  $As_x$  графика закона распределения значений функции автокорреляции по координате  $x$  (по координатам  $y$  и  $z$  формулы аналогичны) равен, о. е.:

$$As_x = \frac{\sqrt{N(N-1)}}{N-2} \cdot \frac{\sum_{i=0}^{N-1} (\rho_{x_i} - \overline{\rho_x})^3}{N\sigma_{\rho_x}^3}, \quad (3.3)$$

где  $N$  – количество точек функции автокорреляции;  $\rho_x$  – текущее значение функции автокорреляции по координате  $x$ ;  $\overline{\rho_x}$  – среднее значение функции автокорреляции по координате  $x$ ;  $\sigma_{\rho_x}$  – несмещенное среднеквадратическое отклонение  $\rho_x$ . Ошибка коэффициента асимметрии определяется числом точек  $N$  для АКФ

по любой координате:  $S_{As} = \sqrt{\frac{6N(N-1)}{(N-2)(N+1)(N+3)}}$  (для данных

табл. 3.1 при  $N = 10$  тыс. точек имеем  $S_{As} = 0,024$  о. е.); коэффициент эксцесса  $Ex_x$  графика закона распределения значений функции автокорреляции по координате  $x$  (по координатам  $y$  и  $z$  формулы аналогичны), о. е.:

$$Ex_x = \frac{N-1}{(N-2)(N-3)} \left[ (N+1) \frac{\sum_{i=0}^{N-1} (\rho_{x_i} - \overline{\rho_x})^4}{N\sigma_{\rho_x}^4} - 3N + 3 \right], \quad (3.4)$$

причем ошибка коэффициента эксцесса также определяется числом  $N$ ; сдвиг  $Nr$ , соответствующий первому пересечению графика АКФ с осью абсцисс (рис. 3.4); суммы амплитуд первых пяти ( $S_5$ ) и трех ( $S_3$ ) экстремальных пиков АКФ и соотношение этих сумм (коэффициент, характеризующий скорость затухания «паразитных» пиков АКФ):

$$k_S = 0,6 \cdot S_5 / S_3. \quad (3.5)$$

В табл. 3.1 сведены результаты моделирования работы генератора Лоренца при соотношениях параметров, обеспечивающих хаотический режим (строки 2-14, 16), а также характерные результаты, иллюстрирующие работу генератора в режиме затухающих периодических колебаний (строки 1, 15); данные отсортированы по возрастанию коэффициентов  $\sigma$ ,  $r$ ,  $b$  в порядке взаимной очередности. К табл. 3.1 имеются следующие примечания:

– примечания, характеризующие визуально выявленные особенности траектории, описываемой системой на фазовой плоскости  $y(x)$  (см. также рис. 3.3): 1.1) спиралевидная траектория, сходящаяся в точку фазовой плоскости, не совпадающую с началом координат; 1.2) незаполненные «контурные» петли, амплитуды пиков сигналов практически одинаковы; 1.3) равномерно заполненные петли; 1.4) равномерно заполненные петли в области, прилегающей к внешнему контуру петель; 1.5) наличие отдельных вложенных петель; 1.6) одна незаполненная петля, по форме схожая со знаком « $\infty$ »; 1.7) равномерно заполненные петли, тесная корреляционная связь между  $y$  и  $x$ , осциллограммы сигналов  $y = f(t)$  и  $x = f(t)$  практически совпадают; 1.8) равномерно заполненные петли;

1.9) неравномерно заполненные петли с пересечениями в пределах петли; 1.10) равномерно заполненные петли; 1.11) фазовая траектория «вытягивается» в линию – отрезок прямой вида  $y = kx + c$ , т. е. имеет место тесная корреляционная связь между  $y$  и  $x$ , осциллограммы сигналов  $y = f(t)$  и  $x = f(t)$  практически совпадают; 1.12) равномерно заполненные петли; 1.13) равномерно заполненные петли, значительная дискретность шага по  $x$  и  $y$  на внешних контурах петель; 1.14) равномерно заполненные петли в области, прилегающей к внешнему контуру петель; 1.15) спиралевидная траектория, сходящаяся в точку, отличную от начала координат; 1.16) петли, пересекающиеся в области, близкой к центру симметрии;

– примечания, характеризующие особенности функции автокорреляции (см. также рис. 3.4 и 3.5): 2.1) быстро спадающие АКФ по всем координатам, множество пиков амплитудами  $\cong -0.7...+0.6$  о. е.; 2.2) множество пиков АКФ значениями  $\cong -0.6...+0.6$  о. е. по координате  $z$ ; 2.3) крайне медленно спадающие АКФ по координатам  $x$  и  $y$ , множество пиков АКФ значениями  $\cong -0.6...+0.4$  о. е. по координате  $z$ ; 2.4) быстро спадающие качественные АКФ по координатам  $x$  и  $y$ , множество пиков АКФ значениями  $\cong -0.5...+0.5$  о. е. по координате  $z$ ; 2.5) множество пиков АКФ значениями  $\pm 1$  по всем координатам; 2.6) быстро спадающие АКФ по всем координатам, множество пиков амплитудами  $\pm 1$  по координатам  $x$  и  $y$ , множество пиков амплитудами  $\cong -0.7, +1$  о. е. по координате  $z$ ; 2.7) медленно спадающие АКФ по координатам  $x$  и  $y$ , множество пиков АКФ значениями  $\cong -0.5...+0.5$  о. е., значительная амплитуда 2-го пика по координате  $z$ ; 2.8) быстро спадающие качественные АКФ по координатам  $x$  и  $y$ , множество пиков АКФ значениями  $\cong -0.15...+0.17$  о. е., значительная амплитуда второго пика по координате  $z$ ; 2.9) быстро спадающие АКФ по всем координатам, множество пиков амплитудами  $\cong -0.7...+0.7$  о. е.; 2.10) медленно спадающие АКФ по координатам  $x$  и  $y$ , быстро спадающая АКФ по координате  $z$ , множество пиков амплитудами  $\cong -0.5...+0.25$  о. е.; 2.11) медленно спадающие АКФ по координатам  $x$  и  $y$ , быстро спадающая АКФ по координате  $z$ , значительные амплитуды 3-го и 5-го пиков;

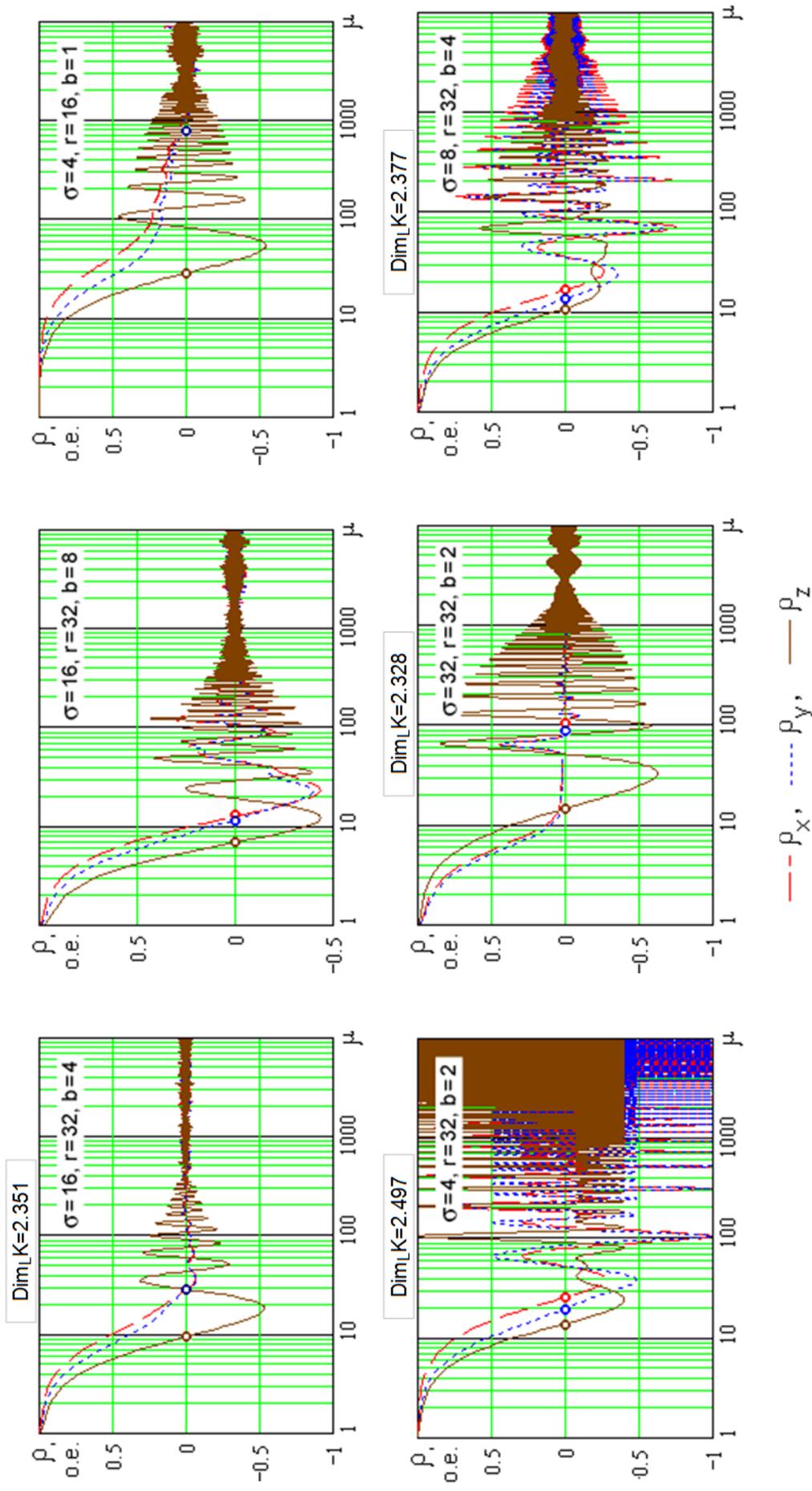


Рисунок 3.5 – Некоторые характерные автокорреляционные функции координат модели генератора Лоренца, не принятых к технической реализации в виду неудовлетворительных параметров

2.12) быстро спадающие АКФ по всем координатам, значительные амплитуды 2-го и 3-го пиков по координатам  $x$  и  $y$ , множество пиков АКФ значениями  $\cong -0.6...+0.3$  о. е. по координате  $z$ ;  
 2.13) быстро спадающие качественные АКФ по координатам  $x$  и  $y$ ;  
 2.14) быстро спадающие АКФ по всем координатам, множество пиков амплитудами  $\cong -0.4...+0.4$  о. е.; 2.15) быстро спадающие АКФ по всем координатам, значительные амплитуды 3-го и 5-го пиков;  
 2.16) АКФ по координатам  $x$  и  $y$  быстро спадают, не достигая 0, значительные амплитуды 2-го пика до первого пересечения с осью абсцисс, быстро спадающая АКФ по  $z$ , множество пиков амплитудами  $\cong -0.6...+0.8$  о. е.

Как правило, быстро спадающая функция автокорреляции имеет множество вторичных пиков значительных амплитуд (строки 6, 9, 12 табл. 3.1) и, напротив, для «гладкой» АКФ характерен медленный спад (строки 7, 10 табл. 3.1), что является, в принципе, естественным свойством динамических систем. В ряде случаев имеем качественные АКФ по координатам  $x$  и  $y$ , и удовлетворительные показатели – по координате  $z$  (строки 4, 13 табл. 3.1), что позволяет рекомендовать к изготовлению генератор с параметрическими коэффициентами, обеспечивающими данные показатели, при условии отсутствия других негативных факторов, как например, значительная дискретность траектории на внешних границах контура петель (строка 13 табл. 3.1). Наилучшее соотношение всех характеристик, принятых в качестве критериев отбора, обеспечивают следующие комбинации параметрических коэффициентов:  $\sigma = 4$ ,  $r = 16$ ,  $b = 2$  (строка 4 табл. 3.1) и  $\sigma = 8$ ,  $r = 32$ ,  $b = 2$  (строка 8 табл. 3.1). Оба варианта апробированы [119].

### **3.2 Апробация экспериментального генератора динамического хаоса как средства натурального моделирования**

В качестве примера рассмотрим реализацию генератора со следующими значениями коэффициентов:  $\sigma = 4$ ,  $r = 16$ ,  $b = 2$ . Все эти коэффициенты можно представить как степень числа 2 с целочисленным неотрицательным показателем степени  $k$ . В то же время из (3.2) и листинга программного блока модели видно, что шаг интегрирования  $h$  так же, как и параметрические коэффициенты,

---

является множителем в многочлене, причем  $h \ll 1$ . Для исключения операции арифметического умножения на число, меньшее единицы (либо операции арифметического деления) рационально выбрать значение  $h$  из ряда чисел  $2^{-k} = 1/2^k$ , где  $k$  – положительное целое число. При выборе шага интегрирования следует учесть, что его снижение не только уменьшает погрешность, но и снижает быстродействие генератора, который должен производить вычисления в режиме реального времени. Кроме того, значительное снижение шага интегрирования приводит к уменьшению конечных приращений выходных координат до величин, сопоставимых с весом младшего бита дробной части в двоичной форме представления числа. Таким образом, естественное ограничение разрядности дробной части числа приводит к тому, что при некотором предельном уменьшении шага интегрирования качественно изменяется характер протекающего процесса. Возникает бифуркация, генезис которой определяется не динамическими свойствами системы, а неправильным выбором шага интегрирования. Эта бифуркация объясняется тем, что системы динамического хаоса являются высокочувствительными к начальным условиям. А при численном интегрировании каждая последующая точка рассчитывается как отстоящая на величину приращения от предыдущей (т. е. каждая предыдущая точка задает начальные условия для последующей). А поскольку приращение функции всегда определяется с погрешностью, происходит постоянное изменение «начальных условий» в течение всего интервала времени моделирования. Этим объясняется принципиальная невозможность определения координат системы с заданной точностью через достаточно длительный интервал времени с помощью моделирования. Возможным остается определение качественного характера процесса, спектральных, корреляционных и энергетических характеристик. Следовательно, необходимо задаться достаточно малым шагом интегрирования, при котором обеспечивается требуемый характер квазиустановившегося процесса.

На рис. 3.6 приведены траектории системы уравнений Лоренца в фазовой плоскости  $y(x)$  при разных величинах шага интегрирования. При шаге счета большем, чем  $1/18,439$  получаем расходящийся процесс, что объясняется слишком большой ошибкой интегрирования. При граничном значении  $h = 1/18,439$  дискретность

траектории является существенной, что ухудшает параметры разрабатываемого ГДХ (см. стрелки на рис. 3.6, а). Дальнейшее уменьшение шага интегрирования приводит к требуемому результату.

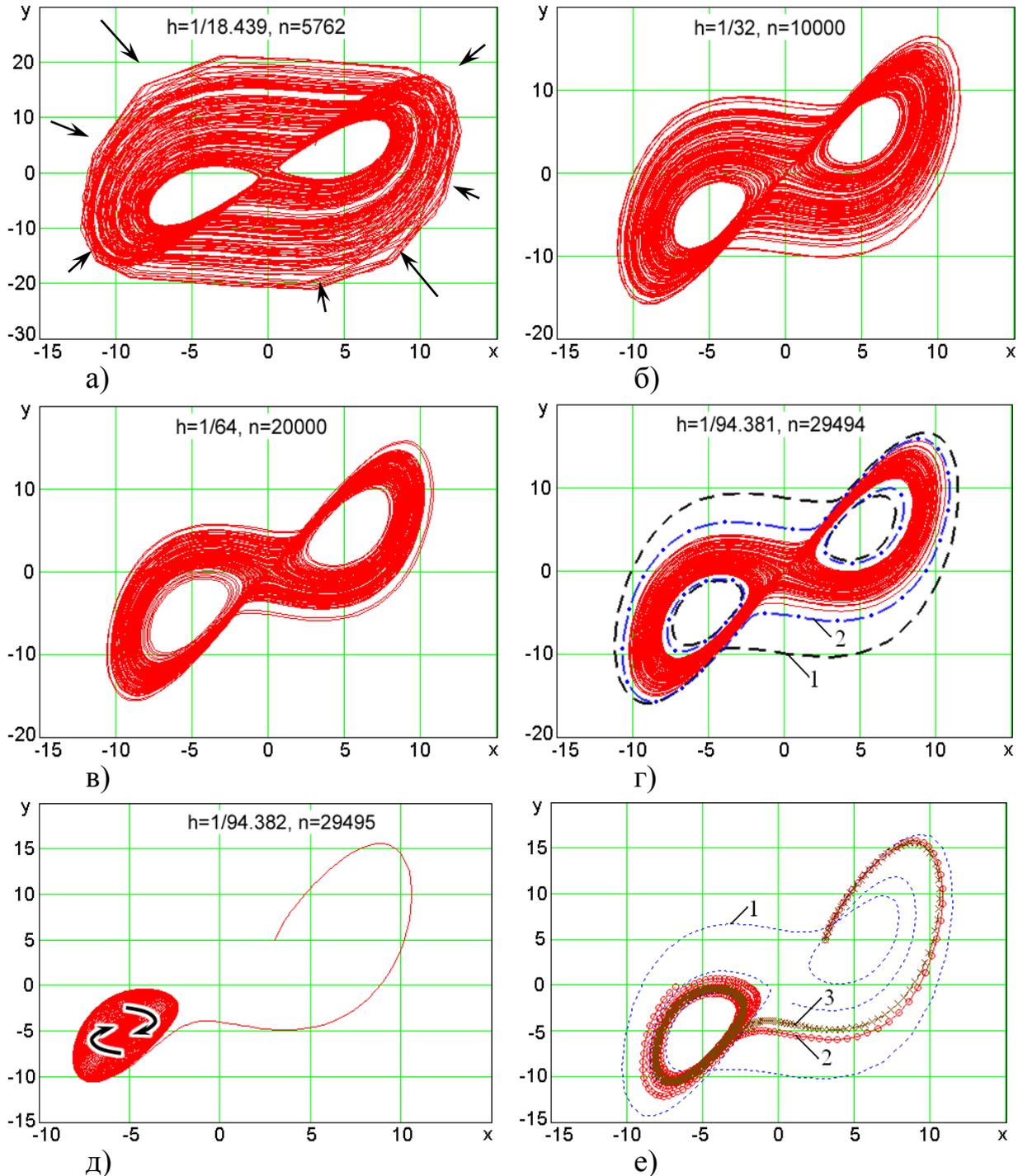


Рисунок 3.6 – Выбор шага интегрирования при моделировании системы уравнений Лоренца (оценочное сравнение хаотических аттракторов)

Фазовые траектории, получены с величинами шага  $h = 1/32$  (рис. 3.6, б) и  $h = 1/64$  (рис. 3.6, в) и характерные двухпетлевые

хаотические аттракторы с требуемыми характеристиками. Дальнейшее уменьшение величины шага до нижнего предельного значения  $h = 1/94,381$  не приносит качественных и существенных количественных изменений (рис. 3.6, г). При меньшем шаге интегрирования траектория системы скачкообразно изменяется на сходящуюся спиральную кривую (рис. 3.6, д).

Сравнение фазовых траекторий, построенных в одном масштабе (рис. 3.6, е), показывает, что аттрактор, полученный моделированием с шагом интегрирования  $h = 1/64$ , качественно не отличается от аттрактора, рассчитанного с минимально возможным (нижним предельным) шагом  $h = 1/94,381$ . Таким образом, принимаем  $h = 1/64$ .

С подстановкой принятых значений ( $\sigma = 4$ ,  $r = 16$ ,  $b = 2$ ,  $h = 1/64$ ) перепишем (3.2) в виде

$$\begin{cases} \Delta x_i = 4(y_{i-1} - x_{i-1})\frac{1}{64}, \\ \Delta y_i = (-x_{i-1}z_{i-1} + 16x_{i-1} - y_{i-1})\frac{1}{64}, \\ \Delta z_i = (x_{i-1}y_{i-1} - 2z_{i-1})\frac{1}{64} \end{cases} \quad (3.6)$$

Для определения пределов изменения величин выходных координат ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), конечных приращений по выходным координатам ( $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$ ) и элементов выражений для приращений функций при различном сочетании слагаемых ( $sm1$ ,  $sm2$ , ...,  $sm6$ ) выполним численное интегрирование системы уравнений Лоренца по приращениям, заданным в (3.6) для  $n = 1,9 \times 10^6$  точек, что соответствует 8-ми часам непрерывной работы генератора. Зная пределы изменения всех расчетных величин, можно задать формат представления чисел в двоичном коде. Так как процесс является не расходящимся, очевидно, что моделирование для расчета большего числа точек  $n$  является излишним, поскольку: 1) при дальнейшем увеличении  $n$  не наблюдается роста ни одной из контролируемых величин; 2) запас в один бит в целой части формата представления числа в двоичном коде обеспечивает двукратный ( $2^1$ ) запас по диапазону изменения числа.

Результаты первого этапа моделирования сведены в табл. 3.2. Как следует из таблицы, модули наибольшего положительного числа и наименьшего отрицательного (находящегося левее всего на числовой оси) приблизительно равны и отличаются друг от друга не более чем на единицу (при округлении до ближайшего целого в стороны расширения диапазона, т. е. в стороны увеличения абсолютных значений чисел). На этом основании делаем вывод о целесообразности использования симметричного относительно начала координат формата представления знаковых чисел с фиксированной запятой. Поскольку вычисления, согласно (3.6), требуют выполнения нескольких последовательных сложений и вычитаний знаковых операндов, наиболее рационально представлять числа в дополнительном коде.

Таблица 3.2 – Пределы изменения вычисляемых величин при численном интегрировании системы уравнений Лоренца

$dx/h$		$x$		$dy/h$		$y$		$dz/h$		$z$	
min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
-45,0	45,17	-10,76	10,75	124,13	123,85	-15,87	15,83	-75,58	113,71	0,11	27,35
$sm1$		$sm2$		$sm3$		$sm4$		$sm5$		$sm6$	
min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
-287,1	286,99	-293,88	294,45	-117,66	118,33	-124,13	123,85	-31,10	150,09	-75,58	113,7
Наибольшее положительное число						294,45					
Наименьшее отрицательное число						-293,88					

Определим минимально необходимую разрядность для представления абсолютного значения целой части наибольшего по модулю числа из табл. 3.2, округленного в сторону расширения диапазона (а именно  $|M|_{\max} = 295 \approx 294,45$ ):

$$m_{\text{int}}^{\min} = \text{ceil}(\log_2 |M|_{\max}), \quad (3.7)$$

где  $\text{ceil}(a)$  – функция преобразования типа, возвращающая наименьшее целое, большее либо равное  $a$ .

---

В соответствии с (3.7) имеем  $m_{\text{int}}^{\text{min}} = \text{ceil}(\log_2 295) = 9$ , т. е. для представления целой части числа, даже без бита знака, недостаточно одного байта. С учетом знакового бита имеем  $m_{\text{int}}^{\text{min}} + 1 = 10$ . Для обеспечения простоты реализации задачи с помощью стандартных микропроцессорных средств, например однокристальных микроконтроллеров общего назначения, принимаем разрядность представления целой части числа с учетом бита знака равной двум байтам. В дальнейшем для увеличения точности возможно младшую тетраду младшего байта выделить для увеличения разрядности дробной части, при этом целая часть будет представлена тремя старшими тетрадами старшего двухбайтного слова. Также, за счет выделения указанной тетрады для записи дробной части, возможно общее сокращение на один байт полной разрядности числа, что при незначительной потере точности обеспечивает прирост средней производительности приблизительно на четверть. Однако, хотя реализация данных решений предельно проста (изменения коснутся лишь масштабирования выходных величин при выводе текущих значений в ЦАП), необходимость в них может возникнуть лишь в исключительных случаях (например, при использовании микроконтроллера с низкой частотой тактирования). В связи со сказанным, принимаем разрядность представления целой части числа с учетом бита знака равной двум байтам,  $m_{\text{int}} + 1 = 16$  бит.

Выбор разрядности дробной части числа выполняем, исходя из требования обеспечения заданной точности представления, учитывая при этом, что наращивание разрядности на каждый байт (точнее – на величину разрядности шины данных, т. е. на машинное слово) приводит к уменьшению средней вычислительной производительности при решении пользовательской задачи. В случае представления дробной части числа одним байтом, вес младшего разряда числа составит  $2^{-8}$ , при этом с учетом двух байт, выделенных для представления целой части знакового числа (см. выше), обеспечивается динамический диапазон, равный 144,49 дБ. Вычислительная схема, основанная на (3.6), является секвентивной, и, в связи с фактическим ограничением разрядности, каждое последующее действие выполняется над числами – результатами предыдущего действия, естественно округленными в сторону сужения динамического диапазона до величины веса младшего разряда дробной части числа. Кроме того, в практике

программирования при описании переменных традиционно применяются типы (type) с четным числом резервируемых в памяти байт (кроме однобайтных типов). В некоторых случаях увеличение разрядности представления числа на один байт до четного значения позволяет рационализировать программу, при этом время ее выполнения может даже уменьшиться по сравнению с использованием операндов меньшей разрядности (например, если в составе микроконтроллера имеются двухбайтные регистры, как то DPTR в микроконтроллерах семейства MCS-51/52, DPX и др. – в МК семейства MCS-251, двух- или четырехбайтные аккумуляторы и (или) арифметико-логические устройства, как, например, в микроконтроллере MSC1210 с базовой архитектурой MCS-51). Так как целая часть числа представлена двумя байтами (см. выше), для записи дробной части числа отведем не один, а два байта (итого 4 байта, т. е. двойное слово – для представления переменной с учетом знака, рис. 3.7), расширив при этом динамический диапазон до 192,66 дБ (рис. 3.8). Фактические динамические диапазоны по выходным координатам, определенные исходя из полученных ранее амплитудных диапазонов изменения сигналов (табл. 3.2), составят при этом 122,98 дБ – по координате  $x$ , 126,35 дБ – по  $y$  и 125,03 дБ – по  $z$ .

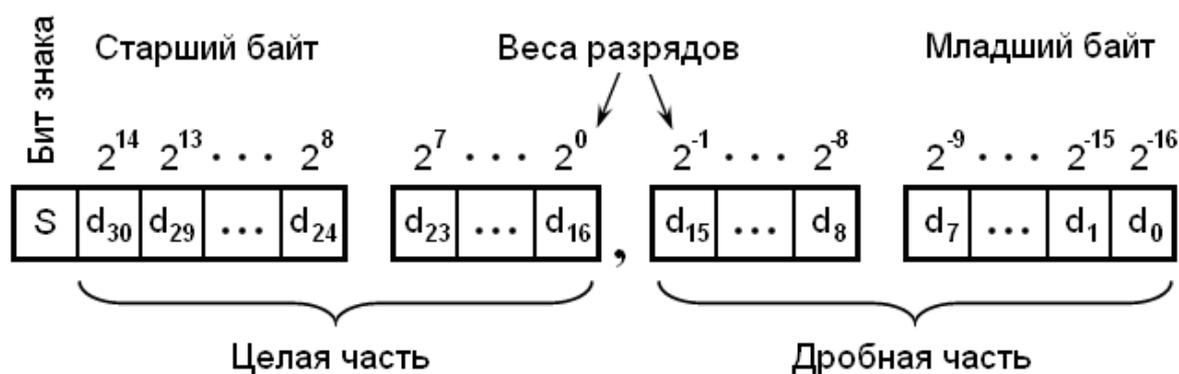


Рисунок 3.7 – Четырехбайтный знаковый формат представления чисел с фиксированной запятой в дополнительном коде

Программа на языке ассемблера микроконтроллеров семейства MCS-51/52 составлена и отлажена в оболочке интегрированной инструментальной среды (ИИС) COMPASS 51 IDE (в некоторых случаях использовалась ИИС Keil  $\mu$ Vision 3); состоит из основной части «Lorenz\_XYZ», содержащейся в исходном файле «Lorenz3d.asm», вспомогательных вычислительных подпрограмм,

представленных файлом «LrnzCalc.asm», и модуля загрузки в цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), именуемого «Lorenz\_DAC» и содержащегося в файле «LrnzDAC.asm».

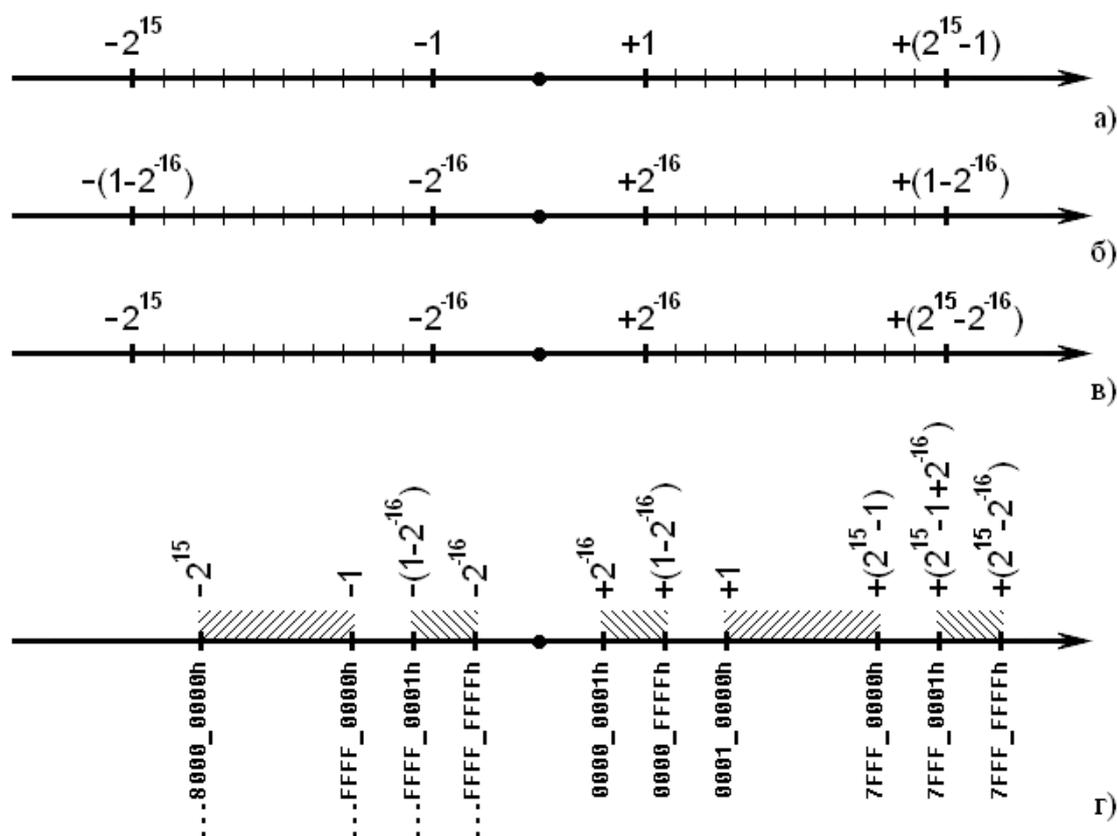


Рисунок 3.8 – Диапазоны чисел, представленных принятым форматом, и размещение их на числовой оси (включая 0 и граничные значения): а) целая часть числа; б) дробная часть; в) полный диапазон; г) совмещение диапазонов, определяемых целой и дробной частями

Подпрограммы умножения двух целых многобайтных чисел, сравнения многобайтного числа с нулем и обращения знака многобайтного числа, компиляция которых составляет модуль вспомогательных вычислительных программ, заимствованы из [8, 46, 81]. Программа составлена с использованием макросредств, директив ассемблера и средств условного ассемблирования. Основной модуль в файле листинга содержит 461 строку, включая распечатки макросов с подстановкой действительных параметров вместо формальных (строки, обозначенные знаком «+») и строки комментариев. Комментарии, касающиеся участков программы, приведены блоками, отделенными директивой «COMMENT» и разделителем «%», что упрощает их визуальное восприятие и структурирует программу. В начальной части основного модуля устанавливаются адреса

промежуточных переменных и выходных данных, объявляются внешние метки, определенные в модулях подпрограмм, выполняется начальная инициализация переменных состояния, задаются макроопределения следующих процедур: сложения четырехбайтных знаковых чисел; вычитания четырехбайтных знаковых чисел; циклического сдвига вправо четырехбайтных операндов; сдвига вправо четырехбайтных знаковых чисел, представленных в дополнительном коде, с сохранением старшего знакового бита; циклического сдвига влево четырехбайтных операндов; сдвига влево четырехбайтных чисел с заполнением младшего значащего бита нулем. Далее, отделенные директивой «SUBTITLE», следуют команды вычислительного цикла, реализующие численное интегрирование, масштабирование выходных величин в соответствии с форматом цифро-аналогового преобразователя и выдачу текущих значений координат в ЦАП.

При ограниченной разрядности представления чисел изменение порядка выполнения равнозначных операций, например перестановкой слагаемых или множителей, может изменить результат. Кроме того, введение или исключение операций умножения/деления на взаимно обратные коэффициенты, либо сокращение коэффициентов также может повлиять на погрешность вычислений. Для уменьшения числа операций логических сдвигов преобразуем систему (3.6) к виду:

$$\begin{cases} \Delta x_i = (y_{i-1} - x_{i-1}) \frac{1}{16}, \\ \Delta y_i = (16x_{i-1} - x_{i-1}z_{i-1} - y_{i-1}) \frac{1}{64}, \\ \Delta z_i = \left( \frac{x_{i-1}y_{i-1}}{2} - z_{i-1} \right) \frac{1}{32} \end{cases} \quad (3.8)$$

Порядок вычислений, заданный в (3.8), соблюдается в разработанной программе. Отметим, что при вычислении приращений по выходным координатам операции деления вынесены за скобки и выполняются однократно в последнюю очередь, что уменьшает погрешность округления (кроме выражения для  $\Delta z$ , где деление выполняется дважды для увеличения быстродействия генератора).

---

В разработанном генераторе применяется высокоскоростной 12-разрядный интегральный цифро-аналоговый преобразователь с последовательным доступом (рис. 3.9, 3.10), состоящий из сдвигового регистра, принимающего данные от микроконтроллера, параллельного регистра, осуществляющего выборку/хранение с возможностью асинхронной загрузки и сброса в 0 В, непосредственно преобразователя «код – ток», источника напряжения (ИОН) и выходного буферного прецизионного операционного усилителя, работающего в режиме преобразования «ток – напряжение». Число каналов ЦАП соответствует числу выходных сигналов (либо два для сигналов  $x$  и  $y$ , либо три – для  $x$ ,  $y$  и  $z$ , в зависимости от модификации генератора). Цифро-аналоговый преобразователь может работать в однополярном или биполярном режимах. Передаточная характеристика в однополярном режиме является смещенной и находится в первом квадранте координатной плоскости  $U_{ЦАП} = f(N_{ЦАП})$ , где  $U_{ЦАП}$  – выходное напряжение,  $N_{ЦАП}$  – входной код преобразователя (рис. 3.10, табл. 3.3). Выходные переменные состояния генератора  $x$  и  $y$ , вычисляемые в основном модуле программы, являются знаковыми четырехбайтными числами, в то время как в загрузочный регистр преобразователя следует отправлять 12-битные (3 тетрады) положительные значения. Поэтому необходимо выполнить масштабирование переменных  $x$  и  $y$  умножением на 128 семикратным логическим сдвигом влево. Для оптимизации программы по времени выполнения, заменим указанную процедуру однократным логическим сдвигом вправо с сохранением бита знака с последующим сдвигом влево на 8 бит троекратным побайтным копированием данных в пределах одного операнда (при этом младший байт числа обнуляется). Потеря одного бита при предварительном логическом сдвиге вправо на один разряд является незначимой, поскольку итоговая разрядность кода, выводимого в цифро-аналоговый преобразователь меньше разрядности исходного операнда. Переменная  $z$  изменяется в пределах от 0,11 до 27,35 о. е. (см. табл. 3.2) и никогда не принимает отрицательных значений. Поэтому ее масштабирование выполняется умножением на 64 шестикратным логическим сдвигом влево.

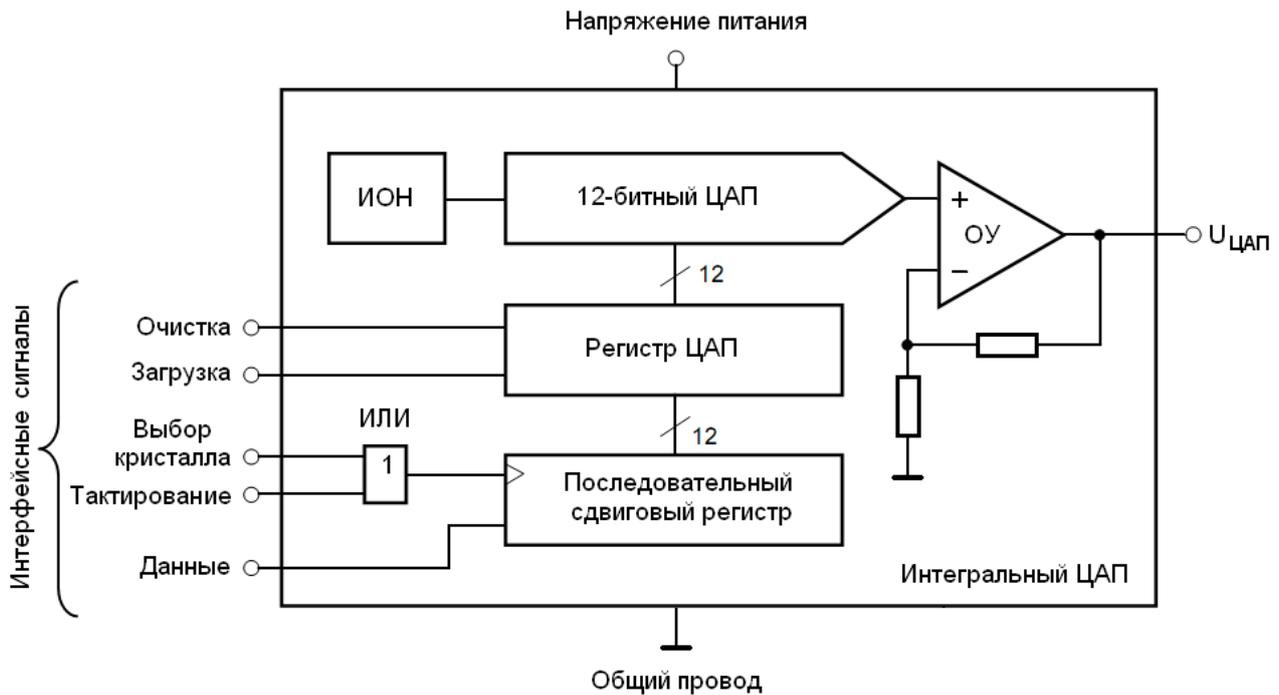


Рисунок 3.9 – Структурная схема одного канала примененного ЦАП

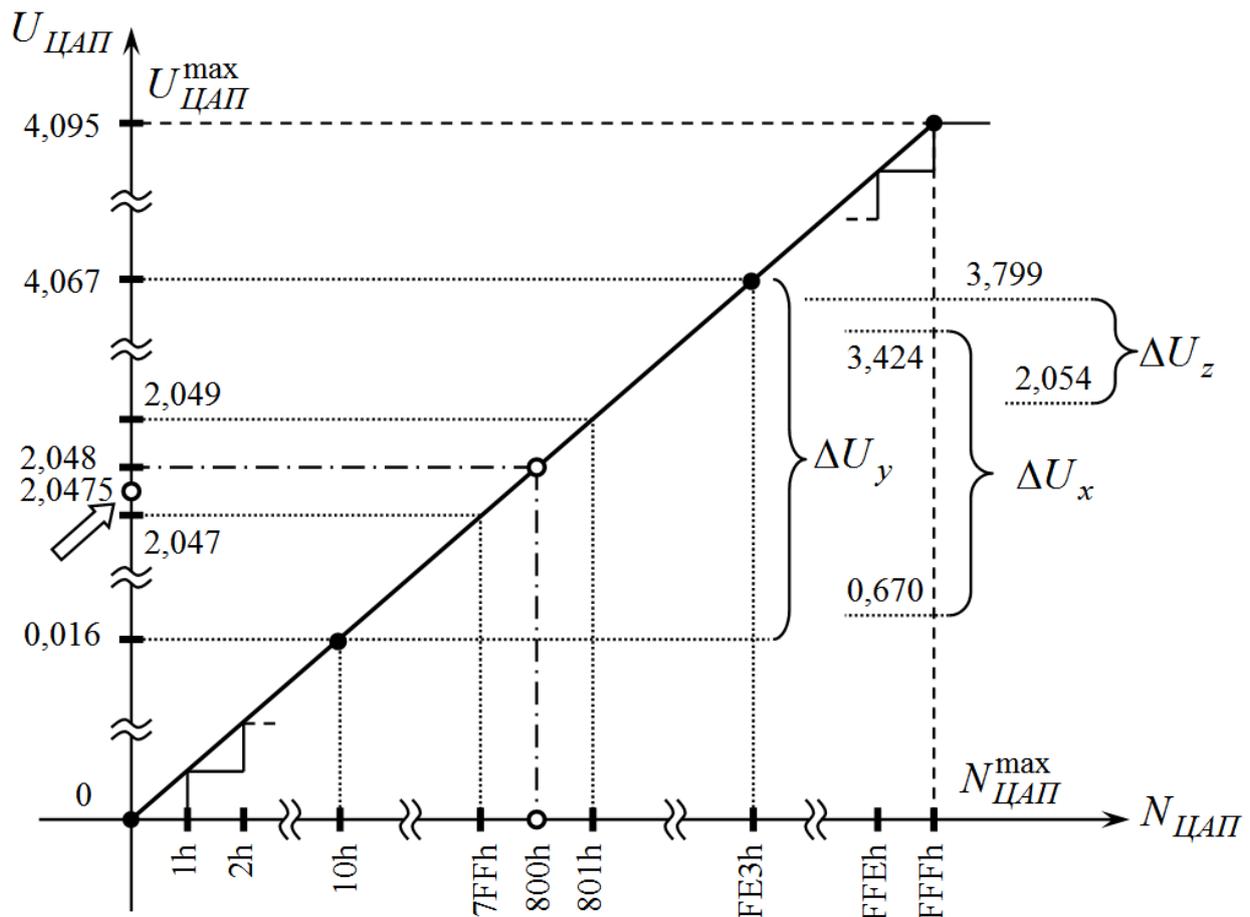


Рисунок 3.10 – Передаточная характеристика примененных ЦАП при однополярном включении с указанием характерных точек и диапазонов изменения величин

Таблица 3.3 – Параметры передаточной характеристики примененных ЦАП при однополярном и биполярном включении

Входной цифровой код и сопоставленное идеальное напряжение на выходе				
Входной цифровой код в 16-ричной системе счисления	Входной цифровой код (десятичный эквивалент)	Напряжение на аналоговом выходе, В		Описание
		Униполярное	Биполярное	
FFFh	4095	+4,095	-4.9976	Полная шкала
801h	2049	+2,049	$-2,44 \times 10^{-3}$	Середина шкалы + 1 бит
800h	2048	+2,048	0	Середина шкалы
7FFh	2047	+2,047	$+2,44 \times 10^{-3}$	Середина шкалы - 1 бит
000h	0	0	+5	Ноль шкалы
Общие параметры шкалы при однополярном/биполярном включении				
Диапазон полной шкалы, В				4,095 / 9,9976
Напряжение, соответствующее наименьшему значащему биту, В				$1 \times 10^{-3} / 2,44 \times 10^{-3}$

Как и в предыдущем случае, для увеличения быстродействия разрабатываемого генератора заменим данную процедуру двукратным логическим сдвигом вправо с сохранением знака с последующим сдвигом влево на 8 бит троекратным побайтным копированием данных в пределах одного операнда (младший байт числа при этом также обнуляется). Очевидно, что масштабирование с уменьшением разрядности представления чисел с 4-х до 3-х байт приводит к уменьшению динамического диапазона по сравнению с показателями, приведенными выше. Отметим, однако, что при указанных пределах изменения выходных сигналов (табл. 3.2) целая часть числа (текущего значения  $x$ ,  $y$  или  $z$ ) до масштабирования не занимала полностью отведенные принятым форматом два байта. Как показывают расчеты, после масштабирования фактические динамические диапазоны по выходным координатам, определенные исходя из известных амплитудных диапазонов изменения сигналов (табл. 3.2), составят 68,799 дБ по координате  $x$ , 72,151 дБ – по  $y$  и 64,836 дБ – по  $z$ . С учетом того, что относительная погрешность цифро-аналогового преобразователя DAC7611 производства Burr-Brown Corp., примененного в генераторе, согласно паспортным

данным не превышает 1 LSB (Least Significant Bit – величина, соответствующая весу младшего значимого бита слова ЦАП), фактические динамические диапазоны выходных сигналов по напряжению, определенные исходя из того, что минимально различимый уровень сигнала приравниваем к 2 LSB, составляют не менее чем: 62,779 дБ для сигнала  $x$ , 66,131 дБ – для  $y$  и 58,815 дБ – для  $z$ . Данные показатели являются удовлетворительными для большинства инженерных приложений и научно-прикладных лабораторных исследований. В случае, если возникнет необходимость построить более высокоточное прецизионное устройство, можно применить 16- или 20-разрядный цифро-аналоговый преобразователь. Основная часть программного обеспечения останется при этом функциональной, изменения потребуют лишь процедура масштабирования выходных переменных внутри цикла в модуле «Lorenz\_XYZ» и модуль драйвера цифро-аналогового преобразователя «Lorenz\_DAC». Также следует отметить необходимость грамотного построения аппаратной части устройства, наличия индуктивной развязки по питанию аналоговых и цифровых цепей и разработки топологии печатной платы, уменьшающей их взаимное влияние.

Изготовлены и испытаны экспериментальные образцы генератора динамического хаоса, реализующего численное интегрирование системы уравнений Лоренца, с параметрическими коэффициентами, определенными с помощью предложенной методики, на основе однокристального микроконтроллера AT89C52-24PI производства Atmel Corp. и двух цифро-аналоговых преобразователей указанной выше марки. Генераторы полностью работоспособны, их параметры соответствуют приведенным расчетам. На рис. 3.11 и 3.12 приведены фотографические отпечатки графиков выходных сигналов, полученные с помощью цифровых запоминающих осциллографов.

Изготовленный генератор был в частности апробирован в составе стенда для изучения процессов растворения твердых фракций и смешивания жидкостей для формирования задающего воздействия двум двигателям, осуществляющим управляемые перемещения лабораторной емкости в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Изготовленный генератор также используется в учебном стенде в лаборатории авторизованного учебного центра «Schneider Electric»

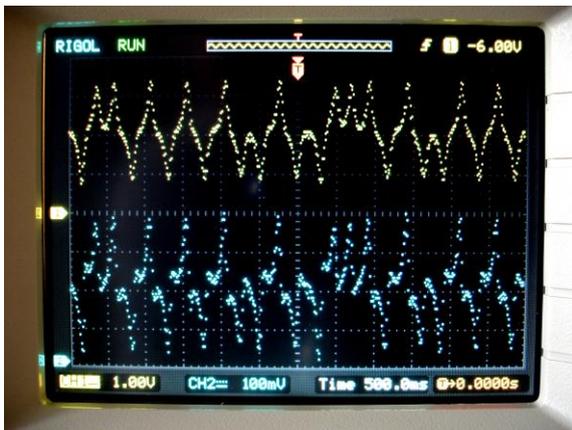
для управляемого хаотического изменения температуры нагревательного элемента (имитация возмущающего воздействия по температуре) в системе стабилизации температуры на основе программируемого логического контроллера Zelio третьей серии.



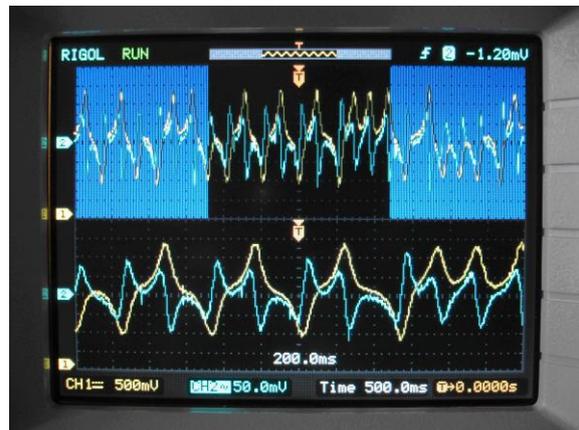
а)



б)



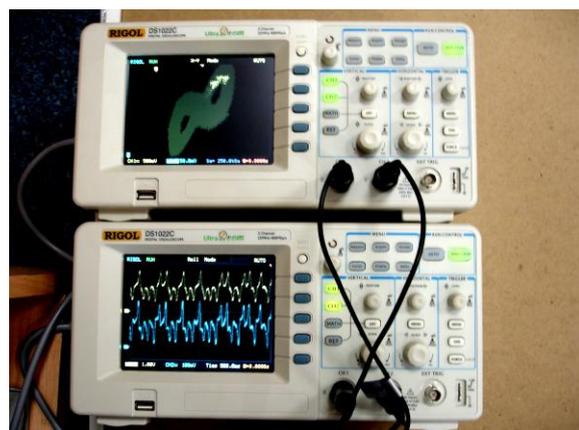
в)



г)



д)



е)

Рисунок 3.11 – Способы отображения графиков сигналов на экране осциллографа: осциллографирование с разверткой во времени (а-г); осциллографирование с параметрической разверткой (д); синхронное отображение сигналов в различных формах на двух осциллографах (е)

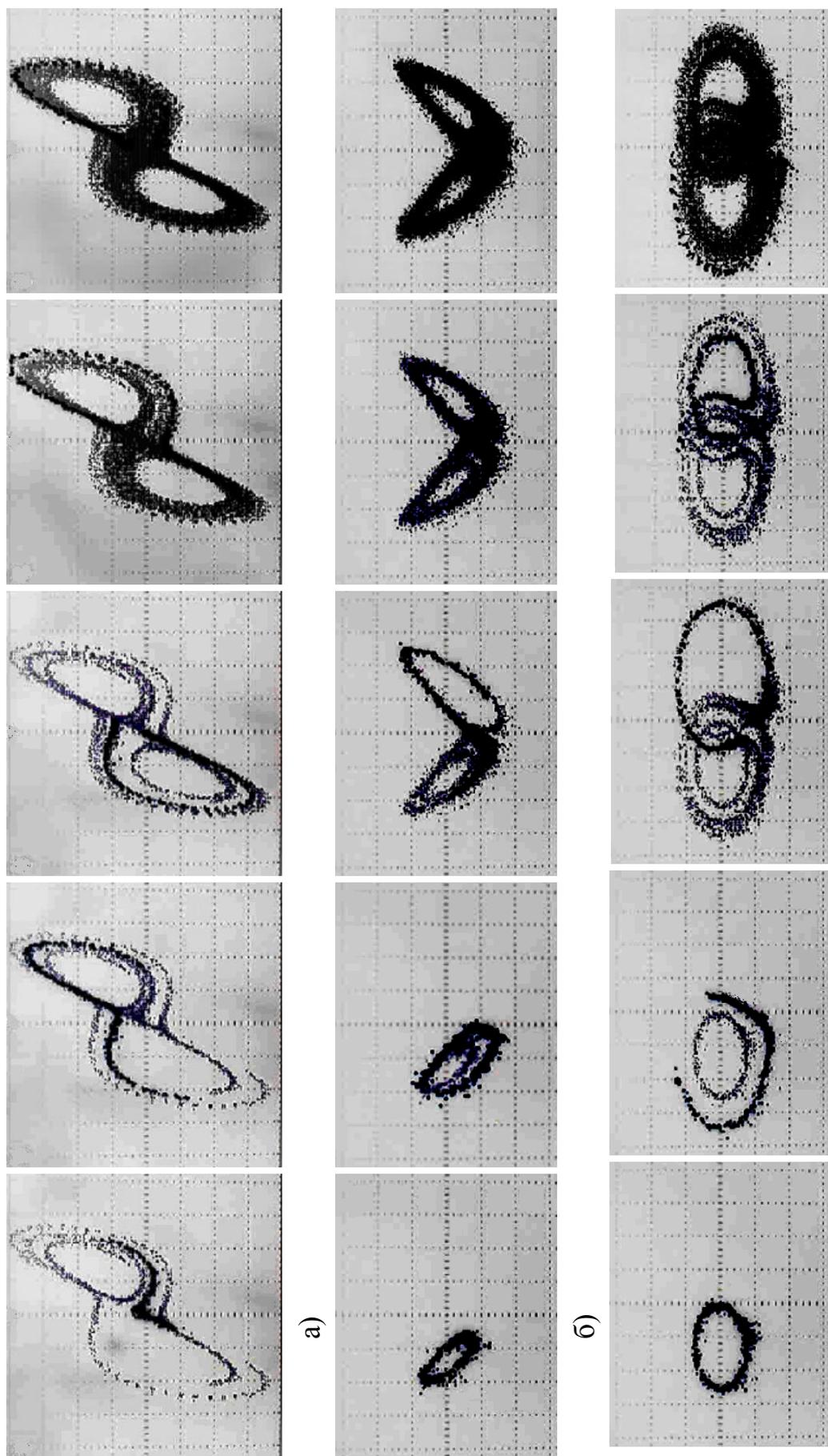


Рисунок 3.12 – Развитие хаотического процесса во времени: а) построение в координатах  $y(x)$ ; б)  $z(x)$ ; в)  $z(y)$

---

Таким образом, предложен способ построения микропроцессорного генератора сигналов динамического хаоса на основе аппаратной платформы низкой производительности с ограниченными ресурсами, заключающийся в программной реализации численного интегрирования системы уравнений Лоренца на языке низкого уровня, с предварительным выбором параметрических коэффициентов и шага интегрирования из ряда чисел  $2^{\pm k}$ , где  $k$  – положительное целое число, что дает возможность заменить операции арифметического умножения (деления) на заранее предустановленный множитель (делитель), кратный двум, логическим сдвигом операнда, представленного в двоичном коде, причем число сдвигов равно соответствующей степени кратности.

Предложена и обоснована методика выбора параметрических коэффициентов, обеспечивающих хаотический режим работы генератора Лоренца с требуемыми показателями качества, заключающаяся в построении трехмерной комбинационной таблицы, описывающей координатную систему, по трем осям которой в первом квадранте откладываются кратные двум значения коэффициентов  $\sigma$ ,  $r$  и  $b$  в пределах от 0 до значений, соответствующих жесткой потере устойчивости с расхождением функции и дальнейшим анализом полученных траекторий на соответствие критериям качества.

Как критерии качества траекторий, описываемых системой динамического хаоса, предложены показатели генерируемых ею сигналов, а именно: статистические показатели сигналов (начальные и центральные моменты первого порядка, смещенные дисперсия и среднеквадратическое отклонение); динамические показатели сигналов (диапазоны изменения, динамические диапазоны); показатели автокорреляционной функции, характеризующие скорость ее спада (сдвиг, соответствующий первому пересечению графика АКФ с осью абсцисс, суммы амплитуд первых трех и пяти экстремальных пиков АКФ и соотношение этих сумм, коэффициенты асимметрии и эксцесса графика распределения значений АКФ); показатели спектра, характеризующие его равномерность в заданном диапазоне частот.

Для представления знаковых чисел, определяющих выходные координаты, конечные приращения по выходным координатам и отдельные элементы выражений для приращений функций при различном сочетании слагаемых, обосновано использование симметричного относительно начала координат формата с

фиксированной запятой с представлением отрицательных чисел в дополнительном коде. Определены минимальные разрядности представления целой и дробной части чисел, обеспечивающие требуемые амплитудные и динамические диапазоны.

Предложена рациональная вычислительная схема для определения приращений по выходным координатам генератора в двоичном коде, в которой для уменьшения погрешностей вычисления, связанных с ограничением разрядности представления чисел, выполнены алгебраические преобразования и перераспределения коэффициентов (делителей при отдельных слагаемых функциональных выражений), приводящие к переносу операций деления в конец вычислительной схемы; при этом фактическая разрядность представления промежуточных величин возрастает за счет увеличения абсолютного значения целой части числа при неизменной фиксированной разрядности дробной части.

### **3.3 Выводы по разделу**

Разработан, изготовлен и испытан генератор хаоса на основе микроконтроллера, разработана программа для микроконтроллера, отличающаяся тем, что операции арифметического умножения (деления) заменены логическим сдвигом операнда, а это существенно ускорило расчеты и позволило моделировать влияние хаоса на нелинейные электрические цепи в «режиме реального времени».

Получил дальнейшее развитие метод натурального моделирования на основе генератора динамического хаоса, использующего дифференциальные уравнения Лоренца и позволяющего задавать хаотические двухпетлевые воздействия в реальную техническую систему или ее модель одновременно по трем координатам, а также, при необходимости, применить генератор в качестве трехосевой хаотической нагрузки.

Впервые на основе компьютерного моделирования процессов хаотизации для оценки их влияния в реальных горных технических системах предложен метод диагностики колебаний конусными датчиками по взаимно перпендикулярным направлениям, который отражает тенденцию возможных фазовых переходов, позволяет учесть поляризацию колебаний и повысить информативность измерений.

---

## 4 ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ СЛОИСТОГО МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

---

### 4.1 Массив горных пород, ударные волны, колебания и колебательные системы, резонансные явления в блоковых и плоскопараллельных структурах

Горная порода – неоднородная по структуре, текстуре и свойствам среда. Неоднородности изменяются в широких пределах, например, раскрытия трещин – от  $10^{-9}$  до  $10^{-1}$  м при длине от  $10^{-3}$  м до сотен метров, размеры включений и природных пустот в массиве – от  $10^{-4}$  м до нескольких метров в сечении, зоны концентрации напряжений – от  $10^{-3}$  м (вокруг скважин) до многих сотен метров (тектонические напряжения). Часто геологические процессы приводят к возникновению упорядоченной неоднородности массива: слоистости, блочности и периодичности элементов неоднородности, что обуславливает анизотропию среды. Для измерений неоднородность является относительным понятием. Когда область контроля значительно превышает размеры элементов неоднородности, то среду можно считать квазиоднородной, а неоднородности проявляют свои свойства только интегрально. Наоборот, если естественная неоднородность не укладывается в изучаемую область пространства, то она возможно и не будет обнаружена. Следовательно, неоднородности в массиве обладают масштабным эффектом. Степень неоднородности при измерениях условно разделяют на четыре группы: 1) неоднородности крупного масштаба, включающие фаціальную изменчивость, тектонические разрывы, зоны выветривания и разгрузки, горно-технологические объекты; 2) неоднородности структуры и состава пород в пределах отдельной пачки, слоя, включая макротрещиноватость, наличие мелких тектонических дислокаций; 3) неоднородность состава пород в пределах элементарного объема (образец), различие в химическом и минеральном составе, форме и размерах зерен, микротрещины; 4) неоднородности реальных кристаллов, дефектность кристаллической решетки, дислокации [29].

В практике геоакустики и сейсморазведки в основном используют волны разрыва, а именно ударные волны: в случаях применения взрыва или при мощном ударном возбуждении, при изучении землетрясений, горных ударов, выбросов пород, угля и газа.

Под ударной волной понимают волну, имеющую скачок давления или других физических параметров. Ударная волна в линейно-упругих средах остается ударной на всех расстояниях от начального участка, однако в нелинейно-упругих средах основную ударную волну называют пластической, так как на ее фронте происходят необратимые явления, а ударную волну, двигающуюся перед ней, упругой. Основная особенность неразрушающего контроля заключается в том, что он не должен изменять (ухудшать) исходные механические свойства объекта, поэтому мощность взрыва или силу удара подбирают минимальной, для которой ударную волну можно считать упругой. Однако этой энергии вполне достаточно для возбуждения колебаний в блоковых и плоскопараллельных структурах. По диапазонам частот упругие колебания классифицируют: до 16 Гц – инфразвуки; от 16 до  $(16-20) \times 10^3$  Гц – звуки; от  $16 \times 10^3$  до  $10^9$  Гц – ультразвуки [135]. Для того, чтобы колебания стали незатухающими, необходимо обеспечить постоянный приток энергии в систему.

Волна – это распространение колебаний в пространстве, происходящее с конечной скоростью. Она является наиболее быстрым механизмом переноса энергии без переноса вещества, позволяющим осуществить в системе переход от неравновесного состояния к равновесному. Критерием перехода процесса от колебательного движения к волновому служат условия квазистационарности:

$$\begin{aligned} L < vT & - \text{колебательное движение;} \\ L > vT & - \text{волновое,} \end{aligned} \quad (4.1)$$

где  $L$  – характерные линейные размеры системы;  $v$  – скорость распространения возмущения;  $T$  – время его заметного изменения (время удара).

Колебательный процесс происходит в системе с сосредоточенными параметрами ( $L < vT$ ), а волновой – с распределенными [20].

На основе измерений скоростей упругих волн в породных массивах и материалах крепей (табл. 4.1), времени соударения и реальных размеров деревянных, бетонных и металлических конструкций и крепей (табл. 4.2) цельный массив горных пород можно отнести к системе с распределенными, разрушенный массив и крепи – к системам с сосредоточенными параметрами.

Таблица 4.1 – Физические свойства горных пород и материалов крепи

Порода, материал крепи	Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$ , $t/m^3$	Скорости волн $v$ , м/с		Коэффициент Пуассона $\mu$	Модуль Юнга $E \cdot 10^{-10}$ , Па
		продольных	поперечных		
Базальт	2,8-2,9	5200-5500	3000-3200	0,15-0,25	6,0-7,5
Кварцит	2,8-2,9	4600-6000	2800-3800	0,15-0,22	5,0-9,0
Гранит	2,7-2,8	5200-5500	3000-3300	0,20-0,30	5,6-7,5
Доломит	2,6-2,8	3600-5000	2100-3300	0,13-0,22	2,6-7,4
Известняк	2,6-2,7	3100-4700	2000-3100	0,11-0,22	3,5-6,3
Песчаник	2,2-2,7	2200-4600	1800-2400	0,15-0,30	1,6-5,0
Алевролит	2,3-2,8	2200-3800	1300-2400	0,20-0,35	1,3-4,0
Аргиллит	2,5-2,8	2200-3000	1200-2200	0,20-0,40	1,2-4,0
Мрамор	2,6-2,8	5300-5500	2800-3200	0,24-0,33	5,5-7,5
Гипс	2,2-2,4	4700-5100	2200-2600	0,30-0,40	3,3-5,7
Уголь	1,4-1,6	1500-1800	800-1100	0,30-0,40	0,2-0,6
Лед	1,0	3980	1990	0,33	1
Бетон	2,3-2,5	3800-4400	2100-2400	0,25-0,33	2,5-3,8
Железо	7,8	5850	3230	0,28	21
Алюминий	2,7	6260	3080	0,34	6,8
Дерево	0,4-1,1	3000-5000	1000-3200	0,20-0,40	0,1-3,0
Пластмассы (оргстекло)	1,2	2670	1120	0,35	0,4

Таблица 4.2 – Результаты оценки крепи как колебательной системы при ударном воздействии (ударник из титана)

Материал крепи	Характерные поперечные размеры $L$ , м	Время удара $T \cdot 10^3$ , с	Произведение $vT$ , м	Условие квазистационарности
Железо	0,01 – 0,5	0,2 – 0,3	1,2 – 1,8	$L < vT$
Гранит	0,1 – 0,6	0,2 – 0,4	1,1 – 1,6	$L < vT$
Бетон	0,1 – 1,0	0,3 – 0,5	1,1 – 2,2	$L < vT$
Гипс	0,01 – 0,05	0,4 – 0,6	1,9 – 2,9	$L < vT$
Алюминий	0,01 – 0,1	0,3 – 0,4	1,9 – 2,5	$L < vT$
Дерево	0,02 – 0,6	0,4 – 2	1,2 – 5,0	$L < vT$
Пластмассы (оргстекло)	0,01 – 0,1	0,5 – 0,7	1,3 – 1,9	$L < vT$

В безграничной линейной среде, где справедлив закон Гука, продольные и поперечные волны распространяются независимо друг от друга [22]:

$$v_p = \sqrt{\left(\frac{1}{\rho}\right)\left(K + \frac{4}{3}G\right)}; \quad v_s = \sqrt{G/\rho}, \quad (4.2)$$

где  $v_p$  и  $v_s$  - скорости продольных и поперечных волн;  $K$  и  $G$  - модули всестороннего сжатия и сдвига,  $\rho$  - плотность. Если модуль сдвига  $G = 0$ , то среда ведет себя как жидкость или газ, при этом поперечные волны в ней не распространяются. При наличии границы продольные и поперечные волны становятся связанными уже в линейном приближении, так, при падении из твердого тела на его границу волны одного типа происходит трансформация части ее энергии в волну другого типа. Кроме того, возникает комбинация плоских неоднородных волн (продольных и сдвиговых), бегущих вдоль границы – волн Релея. Показатели затухания таких волн частотно-зависимы; толщина приповерхностного слоя, в котором сосредоточена энергия, тем меньше, чем короче длина волны. При проведении горных выработок буровзрывным способом приконтурный массив выработок насыщен неглубокими трещинами, поэтому высокочастотные составляющие поверхностных волн быстро затухают. Для реальных твердых тел величина скорости волн Релея близка к скорости сдвиговых волн ( $0,87v_s < v_r < 0,96v_s$ ) [20].

Коэффициент отражения  $V$  представляет собой отношение амплитуды отраженной от границы волны к амплитуде падающей волны; коэффициент преломления (прохождения)  $W$  – отношение амплитуды преломленной волны к амплитуде падающей. Процесс отражения–преломления на каждой границе слоя может повторяться, поэтому необходимо учитывать большое число преломленных и отраженных волн. Если отношение толщины слоя  $h$  к длине волны, распространяющейся внутри его, меньше двух ( $h/\lambda < 2$ ), то слой считается тонким, в другом случае – толстым [135].

Наиболее важной особенностью слоистых сред является сложность волновой картины, поскольку на каждой границе между соседними слоями образуются четыре новые волны – две отраженные (продольная и поперечная) и две преломленные, каждая из которых, попадая на другую границу, станет причиной аналогичного

процесса [14]. Даже в случае образования внутри слоя обменных волн количество отдельных волн в волновом пакете будет конечной величиной, так как в последующих отражениях и преломлениях амплитуда их значительно уменьшается даже без учета затухания в слоях. Если скорости волн в слоях различны, то возникает целая система неоднородных волн.

Передний фронт акустического сигнала всегда распространяется со скоростью продольных волн в массиве, то есть с максимальной скоростью. Диспергирующие свойства горных пород в зависимости от длины волны объясняются слоистостью и трещиноватостью среды, кристаллическим строением и температурным движением частиц, изменчивостью физических свойств и вещественного состава, наличием включений и пустот, структурных блоков и плоскопараллельных структур. Это значит, что в спектральном разложении сигнала конечной длительности всегда присутствуют сколь угодно высокие частоты, для которых  $v_{gp} \approx v_{\phi} \approx v_p$ , где  $v_{gp}$  и  $v_{\phi}$  - групповая и фазовая скорости. Однако доля энергии этих частот в спектре квазимонохроматического сигнала относительно мала. Поэтому передняя часть сигнала, так называемый первый предвестник, имеет малую амплитуду и высокую частоту. Скорость, с которой прибывает основная часть установившегося сигнала, всегда меньше  $v_p$ , рис. 4.1. Учитывая его энергетическую значимость, в последние годы резко увеличился объем работ на преломленных и отраженных поперечных волнах [127].

Акустическое поле однородной нормальной волны в слое имеет вид

$$u_n = A_n \exp \left\{ i\omega \left[ t - \frac{x}{v} \left( 1 - \left( \frac{n\lambda}{2a} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} \sin \left( \frac{\pi n}{a} y \right), \quad (4.3)$$

где  $u$  - смещение, функция координат и времени;  $A$  - амплитуда, в общем виде комплексная величина;  $\omega$  - циклическая частота;  $t$  - время;  $x, y$  - координаты;  $v$  - скорость упругих волн,  $n$  - номер моды,  $\lambda$  - длина волны,  $a$  - ширина волновода [20].

Семейство уравнений, отличающихся номером  $n$ , описывает возмущения, не изменяющие своего вида при распространении в слое, что выполняется при условии

$$\lambda < \lambda_{кр} = 2a/n , \quad (4.4)$$

где  $\lambda_{кр}$  - критическая длина волны для моды с номером  $n$ .

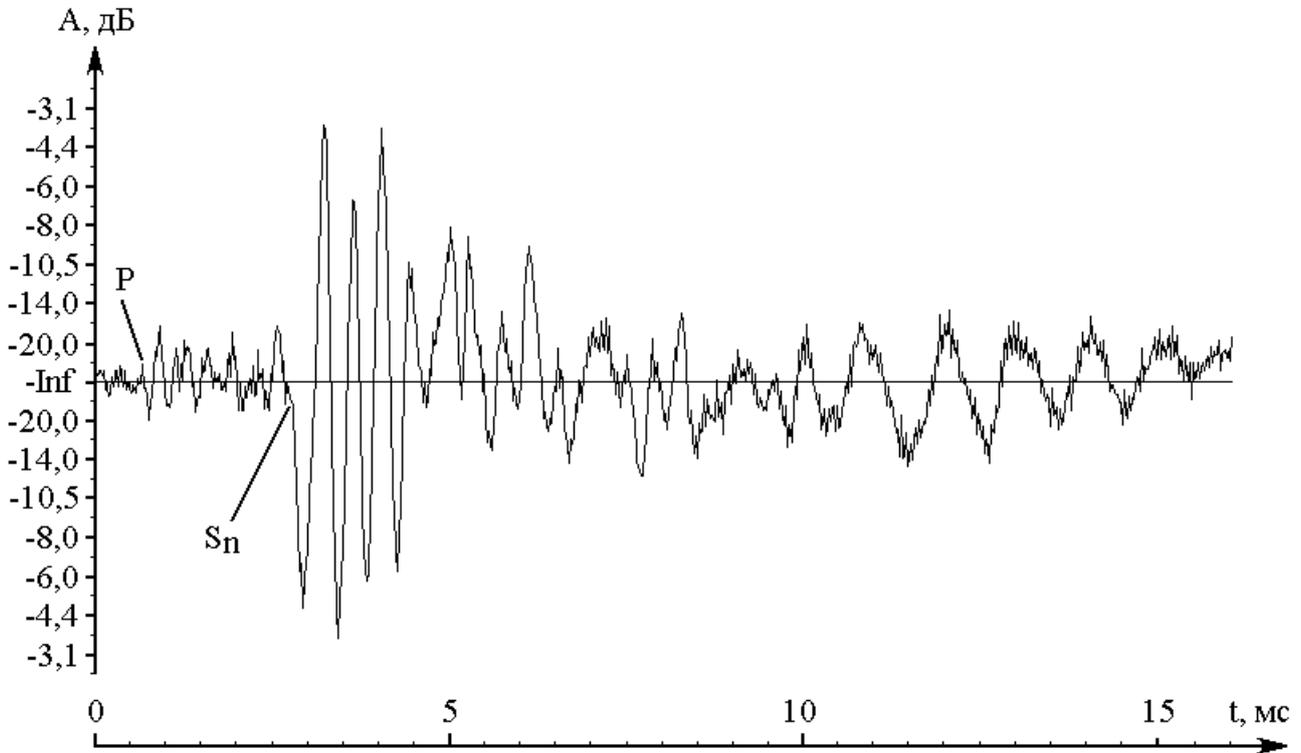
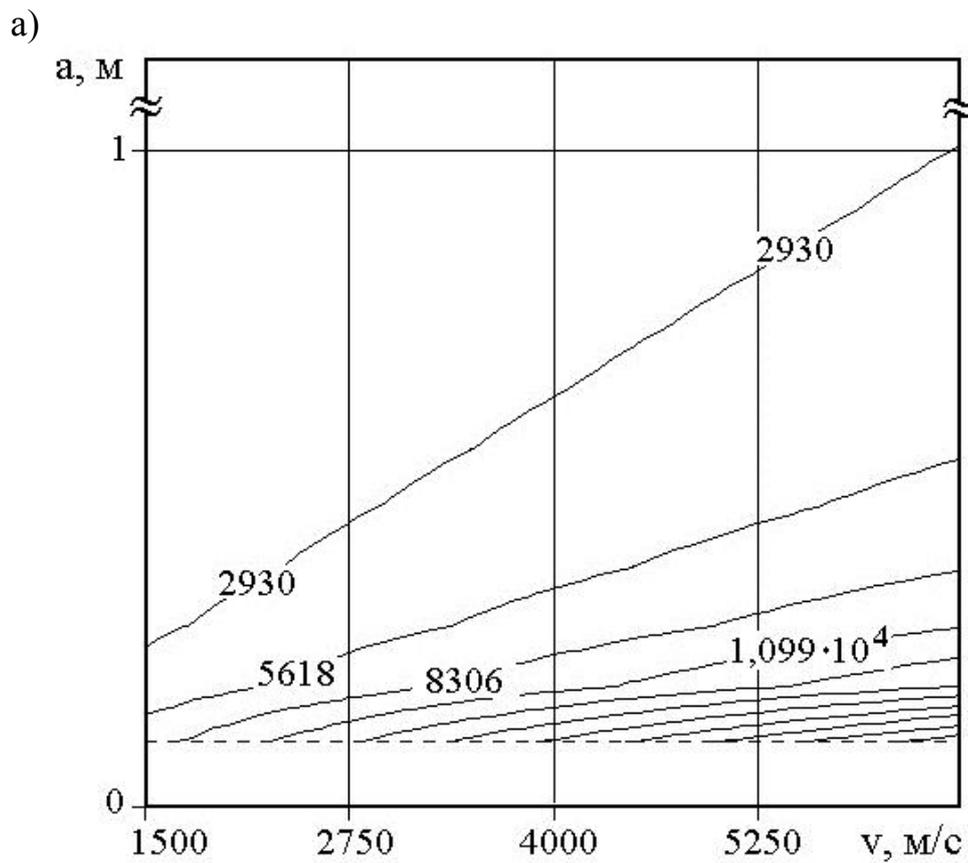
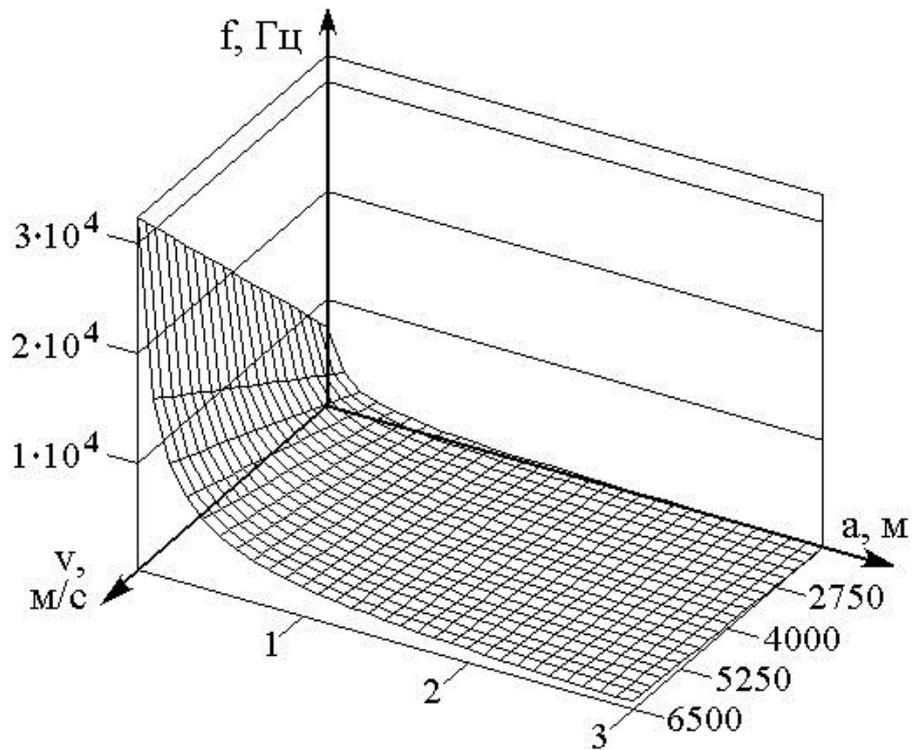


Рисунок 4.1 – Вступление высокочастотной продольной волны, образование поперечной нормальной волны (моды), резонансной с мощностью гипсовой пачки, переход к низкочастотным изгибным колебаниям в кровле камеры при ударном воздействии

Такой волне соответствует критическая частота  $f_{кр} = \frac{vn}{2a}$ . На длинах волн  $\lambda < 2a$  или частотах  $f > v/2a$  в слое можно возбудить любую из мод. Наибольшей длиной волны обладает мода с  $n=1$ . Когда  $\sin \theta = 1$ , а  $\theta = \pi/2$ , слой превращается в резонатор, и между стенками образуется стоячая волна, амплитуда которой постоянная вдоль слоя. Выполнены расчеты графиков зависимости критической частоты первой моды от скорости продольной волны и толщины слоя в диапазонах изменения аргументов, характерных для диагностируемых объектов тоннелей, шахт и подземных сооружений, которые приведены на рис. 4.2.



б)

Рисунок 4.2 – Зависимость критических частот первой моды нормальных волн от скорости продольных волн и толщины резонирующего слоя: а) график поверхности геометрического места точек, соответствующих критическим частотам; б) график эквипотенциальных линий

Если не выполняется условие (4.4), то (4.3) примет вид

$$u_n = A_n \exp \left\{ -\frac{\omega}{v} x \left[ \left( \frac{n\lambda}{2a} \right)^2 - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \exp(i\omega t) \sin \left( \frac{\pi n}{a} y \right), \quad (4.5)$$

т.е. с увеличением расстояния  $x$  вдоль оси слоя волна будет экспоненциально затухать [20].

В этой связи можно сделать очень важное заключение для методики контроля плоскопараллельных структур при одностороннем доступе к массиву, а именно, при увеличении расстояния от источника возбуждения массива, в конечном счете, будут фиксироваться только стоячие волны, резонаторами для которых является обнаженная поверхность выработки и поверхности изменения литологии пород или отслоений.

Таким образом, в приповерхностном слое образуются классические акустические волноводы – участки среды, ограниченные в одном или двух направлениях пустотами, трещинами или другими средами, в результате чего устраняется или уменьшается расхождение волн в стороны, поэтому распространение их вдоль слоев происходит с меньшим ослаблением, чем в неограниченной однородной или неоднородной среде, рис. 4.3. Единственный вид волны, распространяющийся в таких акустических волноводах без изменения своей структуры, - нормальные волны (моды), рис. 4.4. Гармоническая бегущая волна (4.3) – однородная нормальная волна, экспоненциально затухающая (4.5) – неоднородная нормальная волна.

Закрытие трещин, отслоений в массиве или между крепью и массивом под воздействием нагрузки однозначно переводит однородную нормальную волну в неоднородную, экспоненциально затухающую, рис. 4.5.

Длина волны, фазовая и групповая скорости в акустическом волноводе определяются фазовым членом в решении 4.3 и соответственно равны [20]:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{\lambda_{кр}^2}}}; \quad v_{\phi} = \frac{v}{\sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{\lambda_{кр}^2}}} > v; \quad v_{zp} = v \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{\lambda_{кр}^2}} < v. \quad (4.6)$$

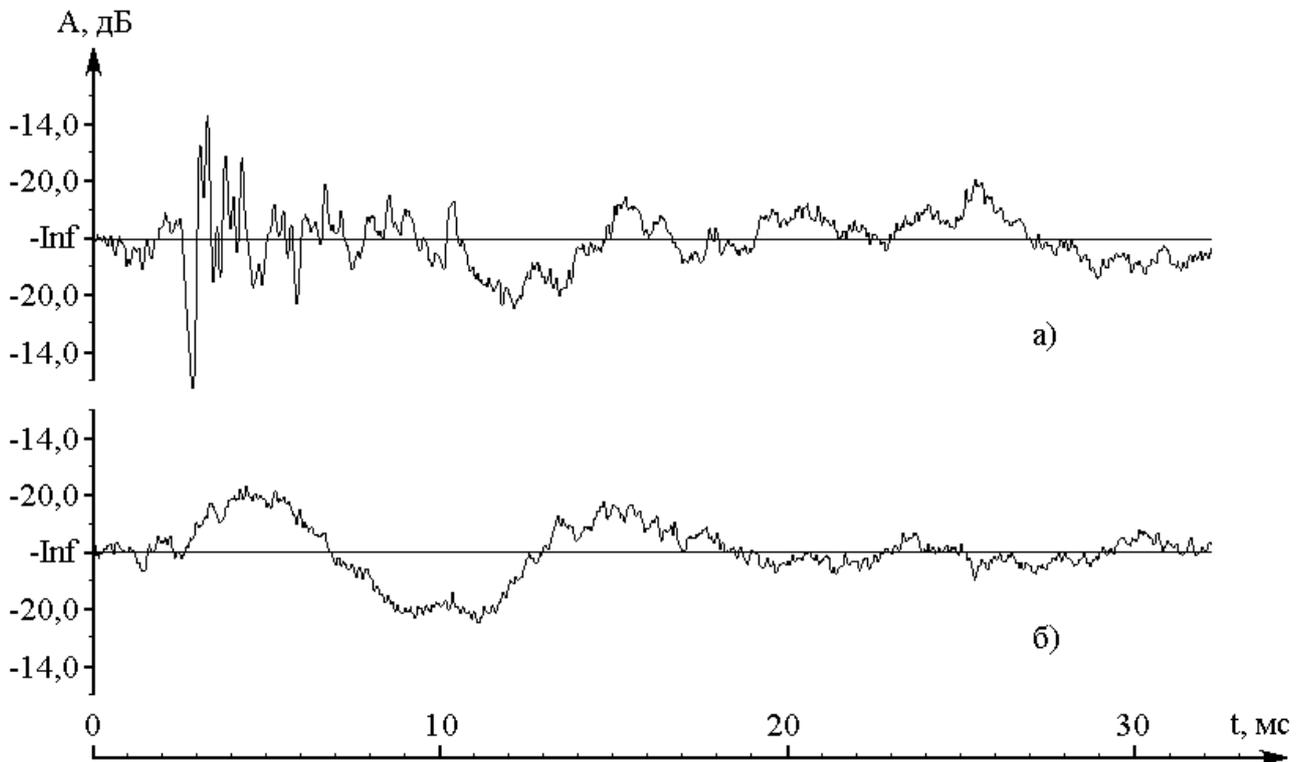


Рисунок 4.3 – Отличие колебаний на контуре плоскопараллельной гипсовой потолочины (а) и в цельном гипсовом целике (б) (запись с магнитофонной ленты выполнена с программным шумоподавлением с помощью ПЭВМ)

Акустические параметры горных пород зависят от физико-механических свойств, слагающих минералов, пористости, а также структуры, состояния, температуры и других внутренних и внешних факторов. Коэффициент затухания увеличивается с ростом частоты из-за рассеивания на кристаллах, однако четкой функциональной зависимости не установлено. В основном зависимость линейная, для гранитов в интервале частот 10-1000 кГц - квадратичная. В осадочных породах коэффициент затухания равен  $1,3-2 \text{ м}^{-1}$  для поперечных волн, он в 1,1-2 раза больше коэффициента затухания продольных волн, но у высокопластичных влажных глин и водонасыщенных песков это различие может достигать 5 и более раз, поскольку в жидкости сдвиговые волны не распространяются. Затухание упругих волн ограничивает базу контроля, однако

способствует выделению в акустическом сигнале в совокупности различных типов волн только тех из них, которые резонируют с блоковыми и плоскопараллельными структурами массива или крепи.

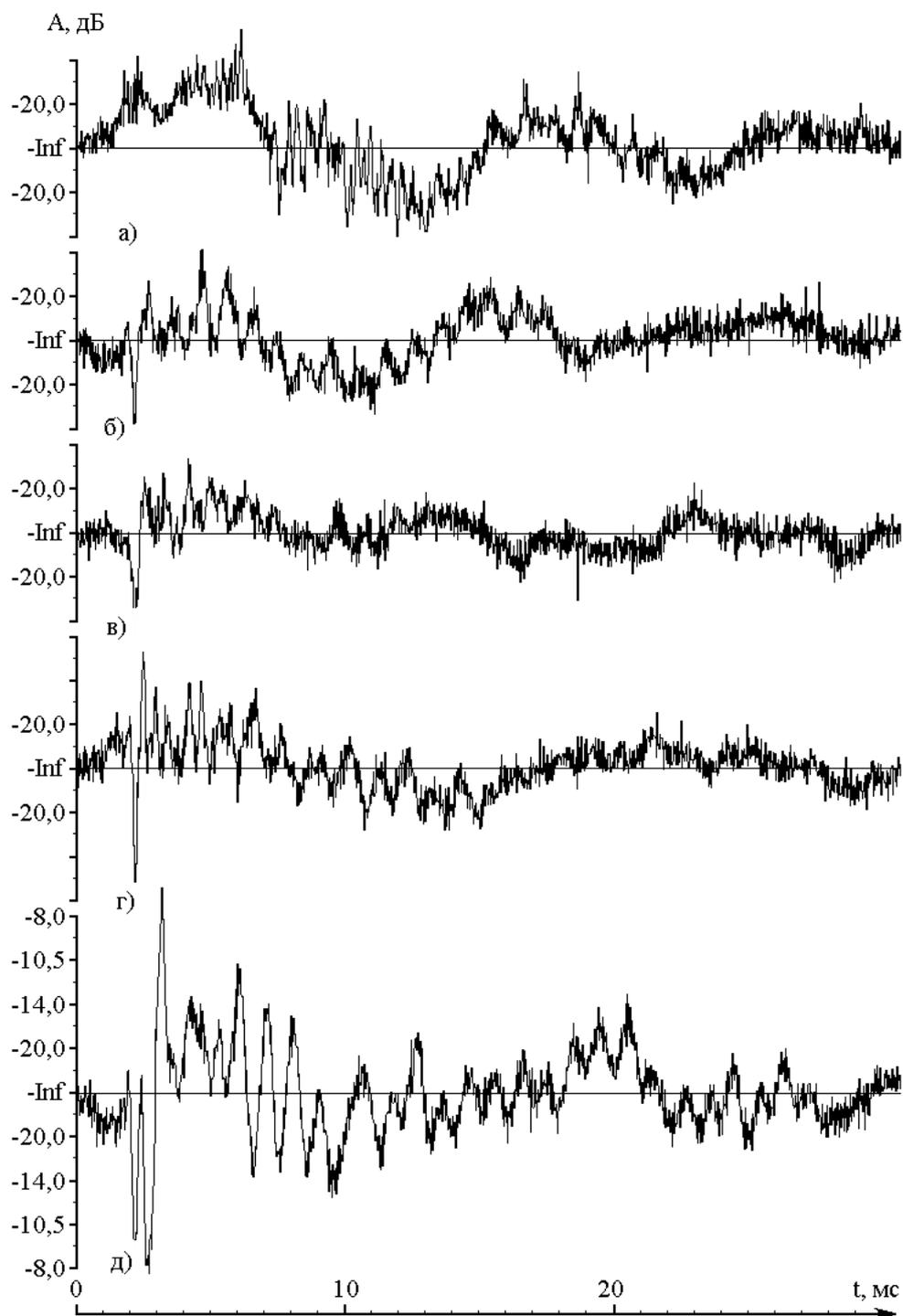


Рисунок 4.4 – Осциллограммы сигналов (без шумоподавления), возникающих в потолочине от ударного воздействия при наличии локального отслоения кровли в центре камеры: а) на границе кровля-целик; б) 1 м от границы; в) 2 м; г) 3 м; д) 4,5 м, в центре

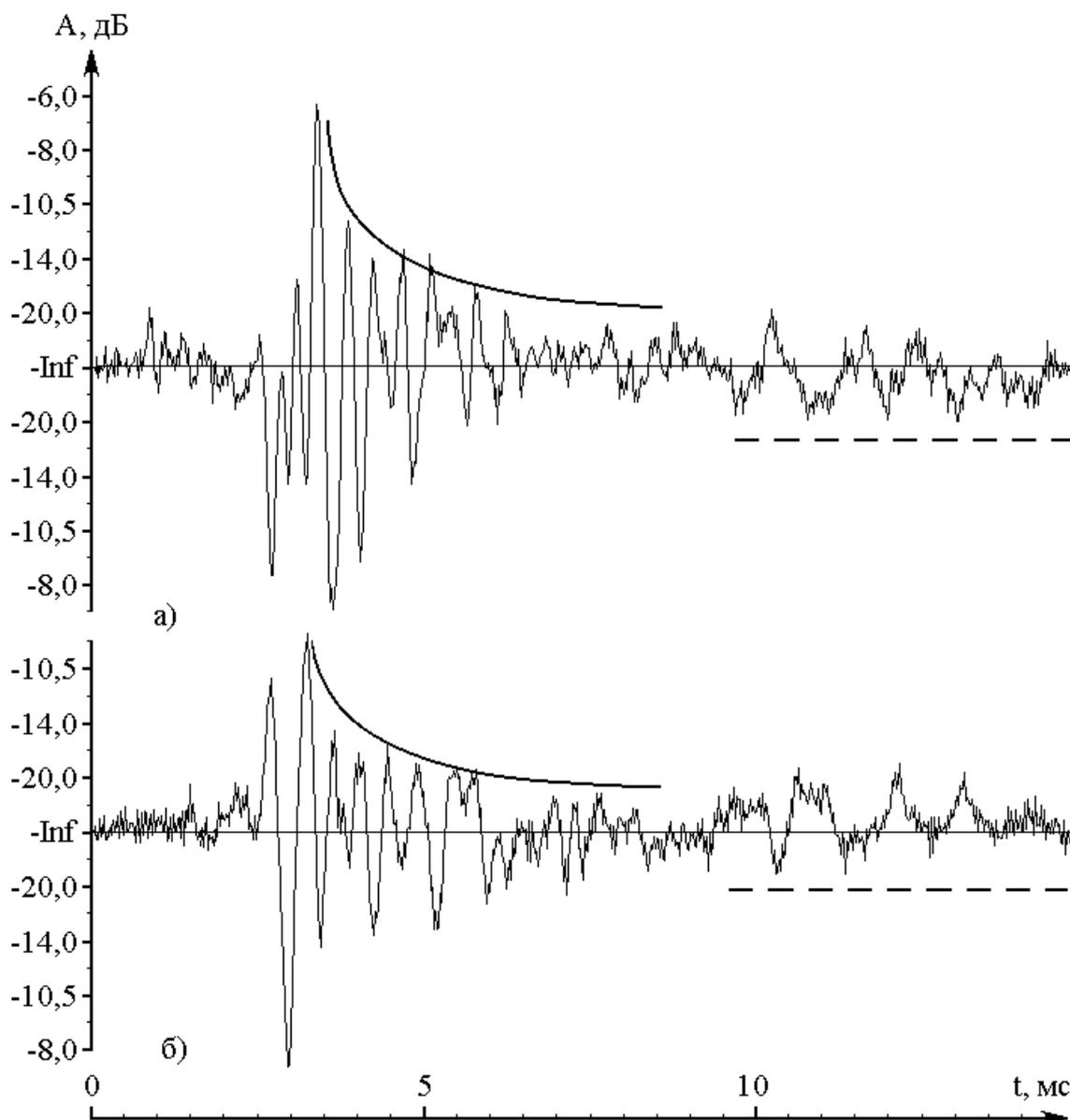


Рисунок 4.5 – Различные типы волн в гипсовой потолочине разной толщины (сплошной линией отмечены участки экспоненциально затухающих неоднородных нормальных волн, пунктирной – участки изгибных колебаний, резонирующих с вышележащим глинистым слоем в кровле целика): а) 0,65 м (больше амплитуда и выше частота поперечных нормальных волн); б) 1 м

В акустическом волноводе можно возбудить множество резонирующих мод, с длинами волн  $\lambda = \lambda_{кр} = \frac{vn}{2a}$ , отличающихся номером  $n$ . С увеличением  $n$  амплитуда моды, как правило, уменьшается, поэтому существенное влияние на волновую картину в слое оказывают в основном первая и вторая моды. Это подтверждается и экспериментальными данными.

В случае сопоставимости амплитуд первой и второй моды нормальных поперечных волн возможна ошибочная интерпретация анализа спектрограмм акустических импульсов, так как по спектрограмме невозможно определить, каким модам соответствуют пики спектральной плотности. Для исключения неоднозначности следует учитывать, что: а) для того, чтобы плоскопараллельный слой пород выступал как акустический волновод, база прозвучивания должна быть не меньше толщины слоя; б) с увеличением базы прозвучивания отношения амплитуд высших мод к амплитуде первой моды уменьшаются; в) с понижением верхней границы частотного диапазона измерения расширяется диапазон возможных баз прозвучивания, в пределах которого регистрируется только первая мода нормальных резонансных колебаний, а его границы смещаются в сторону увеличения абсолютного значения. Например, при прозвучивании бетонных конструкций с применением пропускающего фильтра низких частот с частотой среза 4 кГц первая мода нормальных резонансных колебаний регистрируется для плит толщиной не менее 0,5 м, вторая мода – для плит толщиной не менее 1 м (рис. 4.6, а, цифрами обозначены номера мод). Таким образом, пик спектральной плотности нормальных волн на частоте до 4 кГц при базе прозвучивания до 1 м однозначно соответствует первой моде.

На основе критерия квазистационарности (4.1), исходя из данных табл. 4.1 и 4.2, анализа рис. 4.1-4.5 и формул 4.3-4.6 установлено, что автоматический контроль системы "крепь-породный массив" при проведении горных выработок обеспечивается при условии идентификации локальных геомеханических объектов как систем с сосредоточенными параметрами, причем контроль изменения нагружения их элементов должен осуществляться анализом на соответствие критерию квазистационарности параметров реакции системы на возмущающее воздействие с учетом, в отличие от известных методов, стадийности развития колебательного процесса.

В тонкостенных металлических конструкциях, в длинных стержнях или пластинах (арочные крепи, тубинги, затяжки и т.д.) под воздействием удара возникают деформации изгиба, а, следовательно, изгибные колебания и волны. Длина изгибной волны всегда много больше толщины стержня или пластинки. При распространении изгибных волн каждый элемент стержня или

плоскости пластинки смещается перпендикулярно оси стержня или плоскости пластинки.

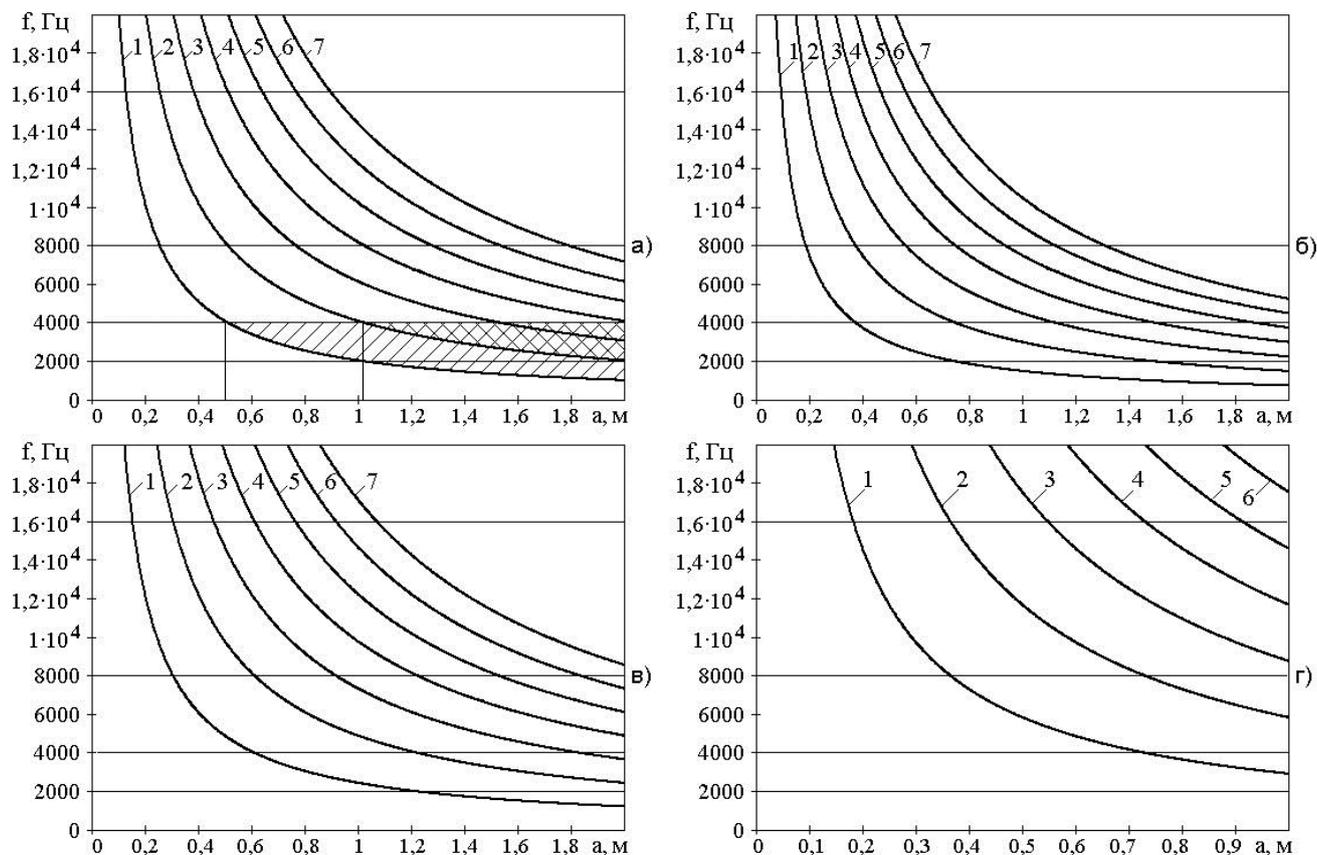


Рисунок 4.6 – Зоны акустической слышимости нормальных резонансных мод с использованием октавных пропускающих фильтров низких частот для плоскопараллельных структур различных материалов: а) бетон; б) аргиллит; в) гипс; г) железо

Фазовые скорости изгибных волн много меньше фазовых скоростей продольных волн, фазовая скорость монохроматической изгибной волны пропорциональна квадратному корню ее частоты, а, следовательно, обратно пропорциональна толщине изгибающегося слоя. По частоте изгибные колебания попадают в низкочастотную область, рис. 4.3, б, 4.5.

## 4.2 Методика вертикальных акустических зондирований глубинного строения приконтурного массива горных пород

По аналогии с методами электрометрического контроля предложены и апробированы следующие методы виброакустического контроля: продольного и взаимноперпендикулярного профилирования на одной или различных равновеликих базах;

вертикального акустического зондирования с тремя возможными вариантами (смещение ударника, смещение приемника, смещение ударника и приемника одновременно и симметрично); кругового зондирования, рис. 4.7. Продольное акустическое профилирование также выполняется в трех вариантах, а именно: направления базы и профилирования совпадают; направления базы и профилирования взаимоперпендикулярны; направления базы и профилирования расположены под произвольным углом, например, профиль направлен вдоль выработки, а прозвучивание производится вдоль или перпендикулярно слоистости пород, не совпадающей с направлением выработки.

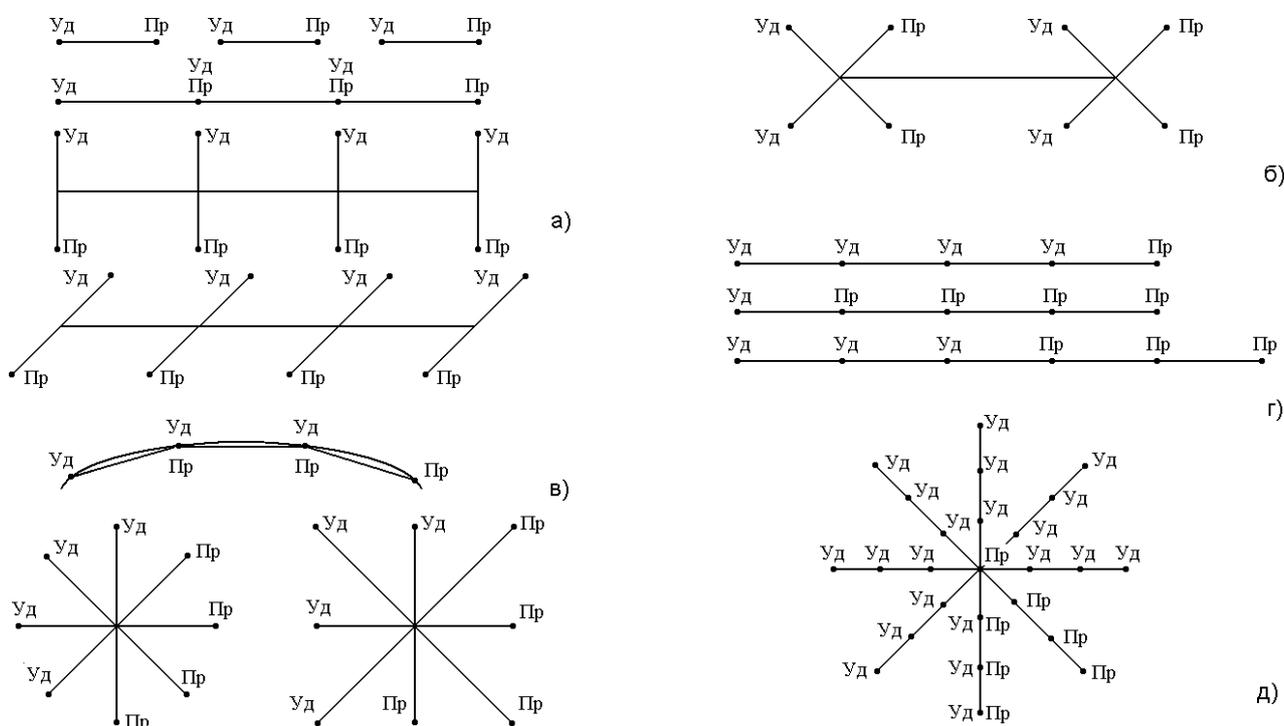


Рисунок 4.7 – Схемы виброакустического контроля устойчивости подземных выработок и конструкций: векторное (а), квадрупольное (б) и круговое (в) профилирование; линейное (г) и круговое (д) зондирование

Продольное акустическое профилирование может выполняться вдоль криволинейного профиля, например, вдоль арочной крепи, вдоль растрела или армировки в шахтном стволе. Детальность контроля (шаг, база) определяются горной задачей и конкретными горно-геологическими условиями, их изменчивостью. Методические параметры диагностики отрабатываются в ходе экспериментальных исследований и ограничиваются необходимой достаточностью. Устойчивость крепи горной выработки можно оценить, простукав

---

каждую десятую (двадцатую) арку один раз в полугодие, оценка же устойчивости отслоений и заколов для обеспечения безопасности горных работ требует ежесменного осмотра, остукивания, а в наиболее опасных местах и автоматизированного контроля с автоматическим оповещением степени опасности.

Вертикальное акустическое зондирование по своей задаче совпадает с вертикальным электрическим зондированием, однако существенно отличается не только по физической сущности происходящих процессов, но и по методике его проведения и интерпретации результатов измерений. Если замена электродов А и В или М и N существенно не влияет на результаты измерений, то замена мест удара и приема акустических колебаний может полностью изменить результаты показания прибора на противоположные по сути, поэтому методика его проведения отличается от методики вертикального электрического зондирования. Однако, как и при электрометрическом контроле, его глубинность зависит от величины базы, оценка массива также преимущественно осуществляется в зоне приемника (при вертикальном электрическом зондировании в зоне приемных электродов MN).

Следуя теоретическим предпосылкам, изложенным в разделе 4.1, только на достаточном расстоянии от излучателя (1-10 м) устанавливаются (отфильтровываются) нормальные поперечные волны достаточной амплитуды, частота которых определяется мощностями плоскопараллельных слоев, одной общей поверхностью которых является обнажение кровли или почвы пласта. Необходимость последовательного увеличения базы обусловлена более высоким затуханием высокочастотных составляющих спектра для нижних слоев, в особенности для слабопрочных глинистых пород непосредственной кровли угольных пластов и пород ложной кровли. Их высокое затухание может обуславливаться трещиноватостью, вызванной давлением от проведения горных работ или буровзрывной проходкой выработок. Кроме того, разрешающая способность приборов оперативного экспресс-контроля позволяет надежно зафиксировать только два максимума на спектрограмме, в этой связи методический прием “вертикального акустического зондирования” с увеличением базы контроля на 0,5-1 м повышает разрешающую способность аппаратуры и достоверность контроля в целом. Замена точек возбуждения и приема акустических колебаний, в отличие от встречного профилирования, позволяет не только повысить

достоверность контроля, но и произвести качественную оценку направления трещиноватости в заколе. Это связано с асимметрией процесса относительно излучателя и приемника при формировании нормальных волн разных частот в асимметрично зажатых блоках.

По взаимному расположению излучателя и приемника акустических колебаний схемы глубинного контроля аналогично электрометрии [29] подразделяются на: векторные, квадрупольные, кругового профилирования, линейного и кругового зондирования, смешанные или их частные случаи и модификации, рис. 4.7.

Глубинность контроля определяется мощностью ударного воздействия, чувствительностью и разрешающей способностью аппаратуры и расстоянием между точками возбуждения и приема колебаний (базой). База контроля должна быть не меньше толщины крепи или глубины приконтурного слоя контролируемого породного массива [98]. Характер отклика на ударное воздействие определяется резонансными явлениями в блоковых или плоскопараллельных структурах контролируемого участка и затуханием упругих колебаний в конструкциях или слоях среды. Дефекты конструкции, в частности полости внутри слоя или на границе слоев с различными свойствами, трещины, заколы и т.п. одновременно приводят к увеличению амплитуды и продолжительности свободных колебаний, что соответствует появлению в спектре резко выраженных резонансов и к повышению затухания в среде при распространении вдоль однородности слоя. Дефекты материала крепи, снижающие ее прочностные и упругие характеристики, проявляются в снижении амплитуды и длительности колебаний, смещении максимума спектральной плотности в сторону низких частот. Уменьшение связи между слоями слоистого материала крепи увеличивает амплитуду свободных колебаний и длительность колебательного процесса, но также смещает максимум спектральной плотности в сторону низких частот. Цельный, прочный материал достаточной жесткости отзывается на ударное воздействие на сравнительно высокой частоте, но переход колебательного процесса к волновому служит наиболее быстрым процессом переноса энергии, а, следовательно, приводит к быстрому затуханию колебаний и к значительному снижению амплитуды уже на малых расстояниях от источника колебаний (пропорционально квадрату радиуса за счет расхождения сферических волн и пропорционально радиусу за счет их затухания). Уменьшение механической связи между смежными элементами,

---

например, бетонными кольцевыми заходками, бетонными или железобетонными блоками или тубингами приводит к значительному уменьшению амплитуды колебаний, регистрируемых по другую сторону границы относительно точки возбуждения.

Основными информативными параметрами при сейсмической, виброакустической, сейсмоакустической, пьезоэлектрической или ультразвуковой диагностике являются: скорости упругих волн; амплитуды колебаний без определения частоты (пиковая амплитуда); доминирующая частота; максимальная амплитуда колебаний на заданной частоте; длительности колебательного процесса и процесса соударения ударника и среды; спектральный состав колебаний, реально определяемый дискретным набором амплитуд на фиксированных средних или заранее выбранных частотах. В случае параллельного измерения силы удара информативными параметрами могут быть различные соотношения амплитуд и длительностей колебательных процессов. Например, для исключения влияния случайных колебаний и шумов выбирают энергетически значимые части спектра колебаний и проводят их автоматическую обработку в цифровом виде:

$$\begin{aligned} A_1 &= A_{m1}/u_m ; A_2 = A_{m2}/u_m ; \\ B_1 &= A_{\Sigma m1}/u_{\Sigma m} ; B_2 = A_{\Sigma m2}/u_{\Sigma m} , \end{aligned} \quad (4.7)$$

где  $A_{m1}$ ,  $A_{m2}$  – максимальные амплитуды, принятые в каналах с максимальным и минимальным усилением соответственно;  $u_m$  – максимальная амплитуда электрического сигнала на выходе ударника;  $A_{\Sigma m1}$ ,  $A_{\Sigma m2}$  – суммы максимальных амплитуд;  $u_{\Sigma m}$  – сумма максимальных значений энергетически значимых полупериодов электрического сигнала на выходе ударника.

Одним из необходимых условий повышения безопасности горных работ является поиск скрытых отслоений и заколов, “ложной” кровли. По литологическому составу и строению слагающих пород “ложную” кровлю разделяют на три типа. Первый тип (наиболее опасный) представлен породами, резко отличающимися по свойствам и литологическому составу от вышележащих, с незначительным сцеплением на контакте между ними. Второй тип слагается породами одинакового или близкого литотипа и характеризуется отслоением пластовой отдельности от вышележащих слоев или наличием зеркал

скольжения между ними. Третий тип “ложной” кровли представлен породами перемятой и комковатой структуры.

В качестве акустического параметра прогноза “ложной” кровли первого типа при возбуждении колебаний ударами может быть принято отношение максимальных значений амплитуд боковых  $A_{\sigma}$  и пластовых  $A_{нл}$  волн в полосе фильтрации 240-480 Гц (фильтр 2) к амплитудам в полосе фильтрации 120-240 Гц (фильтр 1):

$$A_{\sigma}^{\phi 2} / A_{\sigma}^{\phi 1} < 1; A_{нл}^{\phi 2} / A_{нл}^{\phi 1} < 1. \quad (4.8)$$

При возбуждении колебаний взрывами о наличии “ложной” кровли можно судить по отношению амплитуд боковых волн к пластовым  $A_{\sigma} / A_{нл} \leq 0,6 - 1,0$ . На участках без “ложной” кровли (для известняков в непосредственной кровле)  $A_{\sigma} / A_{нл} > 1,2$ . Для прогноза “ложной” кровли второго и третьего типов в качестве акустических характеристик используется отношение амплитуд боковых и пластовых волн  $A_{\sigma} / A_{нл}$  в полосах пропускания 240-480 Гц и 120-240 Гц:  $A_{\sigma}^{\phi 2} / A_{нл}^{\phi 2}$  и  $A_{\sigma}^{\phi 1} / A_{нл}^{\phi 1}$ .

Диагностику незакрепленных участков горной выработки или ствола выполняют с целью выявления участков заколообразования с последующей оборкой кровли или забоя выработки. Выбор точек диагностики производится визуально по месту. При наличии скрытых заколов проводят профилирование. Результаты диагностики не документируются. Исключение составляют участки геологических нарушений [98].

Выполнению виброакустических измерений крепи стволов, капитальных и подготовительных выработок предшествует визуальный осмотр. При этом регистрируется наличие трещин на поверхности, заколов, вывалов и участков «выпучивания», разрушение затяжки, замков и участков металлической крепи. На участках со значительной асимметрией нагрузки, в зонах взаимного влияния сопряженных выработок виброакустика применяется для относительной оценки нагруженности крепи по различным направлениям в горизонтальной плоскости или в вертикальном направлении вдоль ствола [98]. На перекрепляемых участках шахтного ствола или горной выработки диагностика вводится в состав технологического комплекса по оценке качества выполнения

---

ремонтно-строительных работ с целью определения неоднородности бетонной оболочки, степени ее связи с окружающим породным массивом, а при применении металлических и деревянных крепей – для контроля качества забутовки. При обследовании участков, где крепь имеет регулярную пространственную структуру (например тубинговая, рамная, арочная или анкерная крепь), определение информативного параметра выполняют для каждого из элементов. При диагностике, целью которой является оценка глубины трещины на поверхности крепи или определение качества механической связи между отдельными элементами конструкции, базу контроля выбирают симметричной относительно трещины или границы раздела элементов [98].

### **4.3 Структура программного обеспечения автоматизированной системы контроля и сигнализации**

В значительной степени характер применения и функциональные возможности автоматизированных систем сбора и обработки информации определяются их программным обеспечением. Под программным обеспечением (ПО) понимается организованный комплекс программ, описаний и инструкций, обеспечивающих решение задач, обусловленных назначением системы, ее структурой и конкретной инженерной реализацией ее аппаратной части.

Можно выделить четыре основные класса программного обеспечения компьютерной автоматизированной системы контроля и сигнализации и программных инструментов для ее создания: 1) операционная система; 2) инструментальные средства (инструментальные языки и системы программирования); 3) пакеты прикладных программ (прикладные системы); 4) программные средства подсистемы нижнего уровня.

Первые два класса программного обеспечения относятся к базовым. Некоторые компоненты этих классов (операционная система, трансляторы языков, отладчики и др.) являются универсальными для автоматизированных систем различного назначения и поэтому целесообразно использовать готовые программные продукты ведущих фирм-разработчиков программного обеспечения. Остальные компоненты, а также программы третьего и четвертого классов являются объектно-ориентированными и

разрабатываются для конкретной информационно-управляющей системы отдельно. Они тесно взаимосвязаны с ее структурой и назначением, физической сущностью и математическим описанием контролируемого технологического объекта. Разнообразие и специфика применений таких систем препятствует созданию стандартизованных программных модулей указанных классов. В частности автоматизированные системы сбора и обработки информации могут осуществлять контроль устойчивости горных выработок, сдвижений и обрушений кровли, горных ударов, оползневых явлений, выбросов пород, угля и газа, геофильтрации и прорыва шахтных вод. Комплексные системы совмещают функции контроля некоторых или всех перечисленных параметров с функциями автоматизированного управления шахтными механизмами и машинами.

Предложена следующая структура программного обеспечения шахтной автоматизированной системы сбора и обработки информации (рис. 4.8).



Рисунок 4.8 – Структура программного обеспечения автоматизированной системы контроля устойчивости породного массива, сбора и обработки геофизической информации

---

Операционная система (ОС) обеспечивает поддержку работы всех программ и их взаимодействие с аппаратурой. Самостоятельная разработка операционной системы нецелесообразна в связи с наличием готовых ОС для всех семейств ПЭВМ, наиболее известные из них: MS-DOS, MSX-DOS, PC-DOS, OS-2 (для 16- и 32-разрядных ПЭВМ, разработчик - Microsoft); Windows 2000, Windows NT (для 32- и 64-разрядных IBM-совместимых компьютеров на основе процессоров i80386 и старше, включая семейство Pentium, разработчик - Microsoft); UNIX (версии для ПЭВМ различных типов, разработчик - Bell Laboratories) [38, 116].

Классификационными признаками, на основе которых производится выбор ОС для конкретной автоматизированной информационно-управляющей системы, могут служить следующие характеристики: назначение (ОС общего назначения или специализированные); ориентация на тип микропроцессора используемых ПЭВМ; способ организации вычислительного процесса; способ организации управления памятью; способ организации взаимодействия пользователя с вычислительными ресурсами; набор инструментальных языков, поддерживаемых данной операционной системой; диапазон возможностей использования и изменения конфигурации технических средств, в том числе и сетевых средств.

Для компьютерной автоматизированной системы контроля и сигнализации рационально применить стандартную многопользовательскую, многозадачную операционную систему реального времени ориентированную на IBM-совместимую модель центральной ПЭВМ с процессором семейства Pentium, поддерживающую протоколы обмена данными по распространенным промышленным шинам и современные средства коммуникации.

Инструментальные средства относятся к программному обеспечению 2-го класса и предоставляют в распоряжение пользователя возможности, связанные с реализацией решения конкретных проблем автоматизации сбора и обработки информации. Для разработки программного обеспечения автоматизированной информационно-управляющей системы предложено применять стандартные инструментальные средства.

В состав стандартных инструментальных средств входят языки программирования, интегральные инструментальные оболочки и другие программные оболочки, позволяющие программировать и

обеспечивать выполнение тех или иных действий (например задавать алгоритмы и функциональные зависимости вычисления величин). Наиболее подходящими языками программирования высокого уровня для автоматизированных информационно-управляющих систем являются Pascal и C/C++. К программным оболочкам, позволяющим реализовать вычисление сложных математических и статистических функций, относятся пакеты Mathcad, Mathematica, MathLab, Statistica и другие [41, 42, 67].

Одним из основных преимуществ систем автоматизированного сбора и обработки информации на базе микропроцессорных средств является их функциональная гибкость, заключающаяся в возможности настройки таких систем на новые задачи измерений и контроля программным путем, без изменения аппаратной части системы. Это, с одной стороны, позволяет уменьшить затраты в случае необходимости перенастройки системы, а с другой – обеспечивает ее “моральную” долговечность. В связи с этим в состав программного обеспечения компьютерной системы автоматизированной диагностики и контроля состояния технологического объекта рационально включить программные средства, позволяющие в случае необходимости выполнять разработку и отладку соответствующих программ. Одним из таких средств является интегрированная инструментальная среда (Integrated Development Environment, IDE) для МК под Windows COMPASS/51/251 IDE фирмы Production Languages Corporation.

Такие инструментальные средства как языки программирования (процедурно-ориентированные) и интегрированные инструментальные оболочки (машинно-ориентированные) используются квалифицированными пользователями (а не операторами) для перепрограммирования системы на новые задачи измерений и контроля. При этом в состав программного обеспечения желательно включить библиотеки подпрограмм, потребность в которых может возникнуть в будущем с учетом назначения автоматизированной системы и профиля предприятия-заказчика системы (например, для системы автоматизированного контроля состояния горного массива это могут быть подпрограммы, реализующие различные передаточные функции цифровых фильтров, написанные на мнемоническом языке контроллеров подсистемы нижнего уровня). В состав стандартных инструментальных средств могут быть включены также компоненты MS'Office, необходимые

---

для оформления отчетной документации. Благодаря многозадачности операционной системы процесс автоматизированного контроля технологического объекта при достаточном быстродействии системы для заданной скорости мониторинга не прерывается.

К объектно-ориентированным инструментальным средствам относится управляющая программа, обеспечивающая через операционную систему диалог с оператором автоматизированного информационно-управляющего компьютерного комплекса (т.е. объектно-ориентированный человеко-машинный интерфейс пользователя), а также программы систем предупреждения аварий, сбора и промежуточной обработки информации. Они позволяют задавать (программировать) режимы работы всей системы. Объектно-ориентированные инструментальные средства разрабатываются отдельно для конкретных автоматизированных систем.

К классу прикладных систем отнесены программные продукты, работа которых возможна только в оболочке программ-инструментальных средств (функциональная подчиненность) и программные продукты, являющиеся выделенными по некоторым признакам подпрограммами инструментальных средств (структурная подчиненность). Эти программы обеспечивают математическую обработку результатов измерений и временной геомониторинг измеряемых параметров. Математическая обработка включает вычисление статистических характеристик выборок и построение регрессионных моделей, спектральный анализ сигналов, расчет параметров импульсных сигналов, расчет напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов и другими методами. Временной геомониторинг подразумевает сопоставление контролируемых параметров с их граничными допустимыми значениями. Весь пакет программ этого класса должен разрабатываться для конкретной информационно-управляющей системы.

К классу программного обеспечения подсистем нижнего уровня относятся все программы, хранящиеся в постоянной памяти удаленных контроллеров, в частности драйверы обмена с центральной ПЭВМ, подпрограммы инициализации внешних устройств и первичной цифровой обработки сигналов датчиков. Первичная цифровая обработка необходима для преобразования и выделения существенной информации для дальнейшей ее передачи на центральную ПЭВМ.

#### 4.4 Выводы по разделу

Выполнена идентификация элементов геомеханических и геотехнических структур как объектов автоматического контроля технологических процессов проведения и поддержания горных выработок. Установлено, что автоматический контроль системы "крепь – породный массив" при проведении горных выработок обеспечивается при условии идентификации локальных геомеханических объектов как систем с сосредоточенными параметрами, причем контроль изменения нагружения их элементов должен осуществляться анализом на соответствие критерию квазистационарности параметров реакции системы на возмущающее воздействие.

При понижении верхней границы частотного диапазона регистрации акустического сигнала отклика плоско-параллельной или блоковой структуры на ударное воздействие расширяется диапазон возможных баз прозвучивания, в пределах которого регистрируется только первая мода нормальных резонансных колебаний, а его границы смещаются в сторону увеличения абсолютного значения.

Разнообразие горнотехнических задач оценки устойчивости и горно-геологических условий заложения подземных сооружений и выработок предопределяет разноуровневое структурно-блочное строение автоматизированной системы контроля с разделением ее на аппаратную и программную части, а динамическая изменчивость состояния массива – необходимость автоматизированной оценки и выявления из числа многих параметров взаимозависимых и наиболее быстроизменяющихся, при этом типизация элементов на участки, структуры, блоки существенно упрощает методику измерений и открывает принципиальную возможность их наиболее полной автоматизации.

Применительно к задаче контроля устойчивости массива горных пород разработана функциональная структура программного обеспечения автоматизированной системы контроля состояния породного массива и крепи при проведении горных выработок на основе персональной ЭВМ, отличающаяся разноуровневым подходом к проблеме автоматизации в зависимости от технических параметров контролируемого участка и объекта в целом.

---

## 5 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ, МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

---

### 5.1 Цифровая обработка акустических сигналов: математический аппарат и алгоритмическое обеспечение

Алгоритмы цифровой обработки сигналов, используемые в системах автоматизированного контроля состояния породного массива, конструкций и сооружений, как правило, включают фильтрацию и спектральный анализ. При этом исследуют сигналы  $\varphi(t)$ , которые, во-первых, удовлетворяют условиям Дирихле, и, во-

вторых, обладают ограниченной энергией, т. е.  $\int_{-\infty}^{\infty} |\varphi(t)|^2 dt \neq \infty$ . Для

функций, определяющих такие сигналы, существуют прямое и обратное преобразования Фурье [36, 37], следовательно, возможно определение их спектра. Однако для автоматизации контроля состояния породного массива чаще всего используется не непосредственно спектр, а его производные параметры, например, такие как: отношение амплитуд или энергий сигнала в двух определенных частотных полосах, коэффициент затухания конкретных гармонических составляющих и др. Это связано в первую очередь с тем, что размер вектора коэффициентов дискретного преобразования Фурье совпадает с размером вектора мгновенных значений анализируемого сигнала. Для приборов оперативного контроля и контроллеров нижнего уровня автоматизированных систем необходимо разработать методы и алгоритмы цифрового преобразования сигнала из временной области в частотную, обеспечивающие уменьшение размера выходного вектора преобразования по отношению к входному. Компактность вектора коэффициентов такого преобразования упрощает выбор параметров и критериев контроля и оценку исходного сигнала на соответствие этим критериям. Учет особенностей импульсных акустических сигналов отклика на ударное воздействие позволит повысить точность и информативность методов.

Затухающий аperiodический сигнал  $\varphi(t)$  представим как суперпозицию произведений периодических сигналов  $\varphi_{p_i}(t)$  на единичные прямоугольные импульсы  $\Pi_i(t_i, T_{u_i})$ , рис. 5.1:

$$\varphi(t) = \sum_i \varphi_{p_i}(t) \cdot \Pi_i(t_i, T_{u_i}), \quad (5.1)$$

где  $t_i$  - момент времени, соответствующий середине  $i$ -го прямоугольного импульса,  $T_{u_i}$  - его длительность.

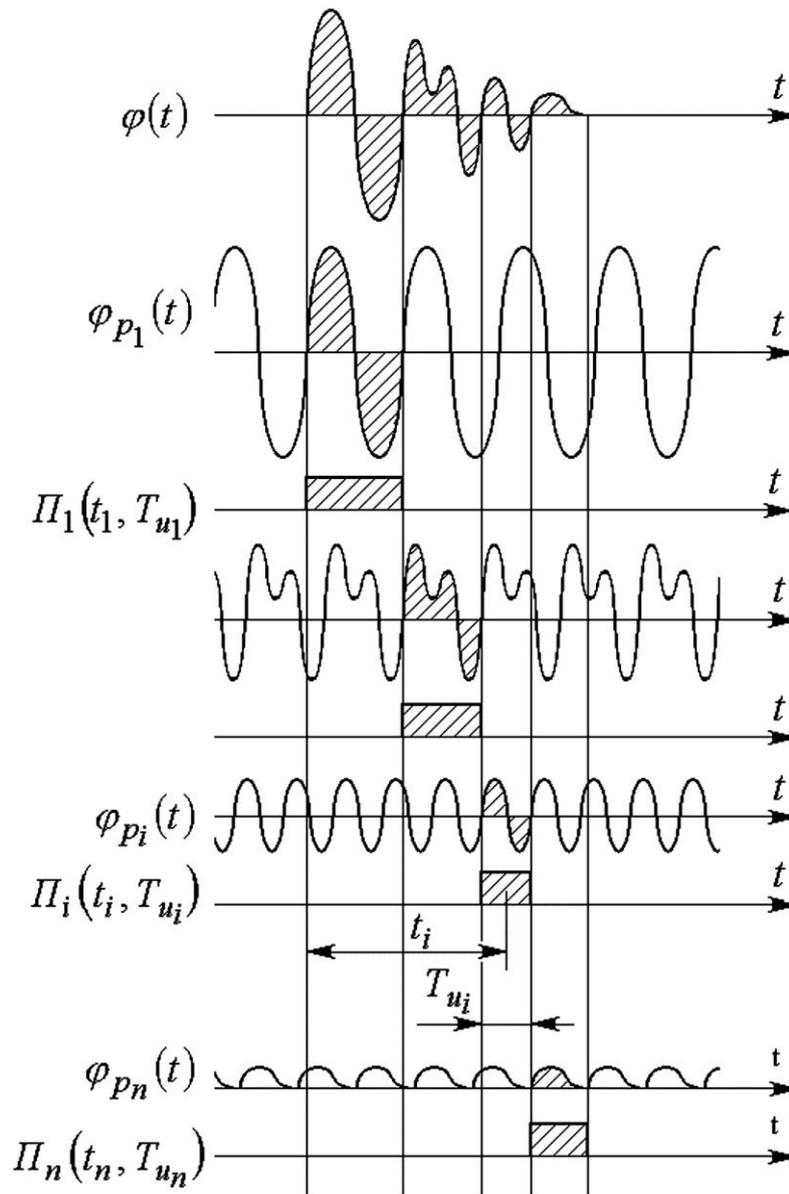


Рисунок 5.1 – Вариант разбиения аperiodического сигнала на временные интервалы точками пересечения с осью абсцисс

Так как преобразование Фурье (ПФ) является линейным преобразованием, то ПФ линейной комбинации некоторых функций  $\varphi_i(t)$  равняется аналогичной линейной комбинации ПФ этих функций:

$$\text{если } \varphi_i(t) \leftrightarrow \Phi_i(f), \text{ то } \sum_{i=1}^n a_i \varphi_i(t) \leftrightarrow \sum_{i=1}^n a_i \Phi_i(f), \quad (5.2)$$

где  $\varphi_i(t)$  - функция, удовлетворяющая условиям Дирихле,  $\Phi_i(f)$  - ее ПФ,  $a_i$  - постоянный коэффициент.

В соответствии с (5.2) для формулы (5.1) справедливо следующее выражение:

$$\varphi(t) \leftrightarrow \Phi(f) = \sum_i \Phi_{(p \cdot \Pi)_i}(f), \quad (5.3)$$

где  $\Phi_{(p \cdot \Pi)_i}$  - преобразование Фурье произведения, стоящего под знаком суммы в (5.1)  $i$ -й периодической функции, умноженной на прямоугольный импульс:  $\varphi_{p_i}(t) \cdot \Pi_i(t_i, T_{u_i}) \leftrightarrow \Phi_{(p \cdot \Pi)_i}(f)$ .

Известно свойство преобразования Фурье, согласно которому ПФ произведения двух функций  $\varphi_1(t) \cdot \varphi_2(t)$  равняется свертке их ПФ:

$$\varphi_1(t) \cdot \varphi_2(t) \leftrightarrow \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_1(f') \Phi_2(f - f') df' = \Phi_1(f) * \Phi_2(f). \quad (5.4)$$

Если  $\varphi_{p_i}(t) \leftrightarrow \Phi_{p_i}(f)$ ,  $\Pi_i(t_i, T_{u_i}) \leftrightarrow \Phi_{\Pi_i}(f)$ , то в соответствии с (5.1) и (5.4) формулу (5.3) можно переписать в виде:

$$\varphi(t) \leftrightarrow \Phi(f) = \sum_i \Phi_{(p \cdot \Pi)_i}(f) = \sum_i \Phi_{p_i}(f) * \Phi_{\Pi_i}(f). \quad (5.5)$$

Так как для каждого  $i$ -го прямоугольного импульса  $\Pi_i(t_i, T_{u_i})$

справедливо выражение 
$$\Phi_{\Pi_i}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \Pi_i(t_i, T_{u_i}) e^{-j2\pi ft} dt =$$

$$= \int_{\frac{-T_{u_i}}{2}-t_i}^{\frac{T_{u_i}}{2}-t_i} e^{-j2\pi ft} dt = e^{j2\pi ft_i} \frac{\pi f T_{u_i}}{\pi f}, \text{ то формулу (5.5) можно переписать в}$$

виде:

$$\varphi(t) \leftrightarrow \Phi(f) = \sum_i \Phi_{(p \cdot \Pi)_i}(f) = \sum_i \Phi_{p_i}(f) * e^{j2\pi ft_i} \frac{\pi f T_{u_i}}{\pi f}. \quad (5.6)$$

Таким образом, спектр исходного аperiodического сигнала однозначно связан со спектрами мнимых периодических колебаний  $\varphi_{p_i}(t)$ , что подтверждается моделированием и экспериментальными данными (см. раздел 5.3). В этой связи сформулирован вывод: спектр импульсного сигнала реакции блоковой или плоскопараллельной структуры контролируемого геомеханического объекта на возмущающее ударное воздействие является суммой конечного числа сверток прямых преобразований Фурье мнимых периодических сигналов и смещенных единичных прямоугольных импульсов, причем критическая частота первой моды колебаний обратно пропорциональна удвоенной толщине структуры, что принципиально позволяет автоматизировать контроль объекта в режиме реального времени на основе спектров выделенных периодических сигналов.

Рассмотрев колебания какой-либо частицы  $M$  породного массива, удаленной на некоторое расстояние от точки воздействия импульсной силы при ударно-волновом контроле, можно заключить, что до прихода фронта волны частица находится в состоянии покоя. В момент времени  $t_1$ , определяемый скоростью распространения волны в массиве, частица приходит в колебательное движение, которое характеризуется следующими параметрами [55]: амплитудами колебаний  $a_1, a_2, \dots, a_i, \dots$  в моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots$  соответственно; периодом  $T$  и частотой  $f = 1/T$  колебаний; затуханием волны (уменьшением амплитуды  $a_i$ ) в течение времени  $t_i$  или вдоль линии распространения на участке, равном длине волны  $\lambda$ . Распространение сейсмических волн в породном массиве происходит по законам геометрической оптики, т. е. на границах раздела и неоднородностей волны могут отражаться, преломляться и рассеиваться. Таким образом, амплитудные

характеристики акустических импульсов несут информацию о пространственной структуре и напряженно-деформированном состоянии массива.

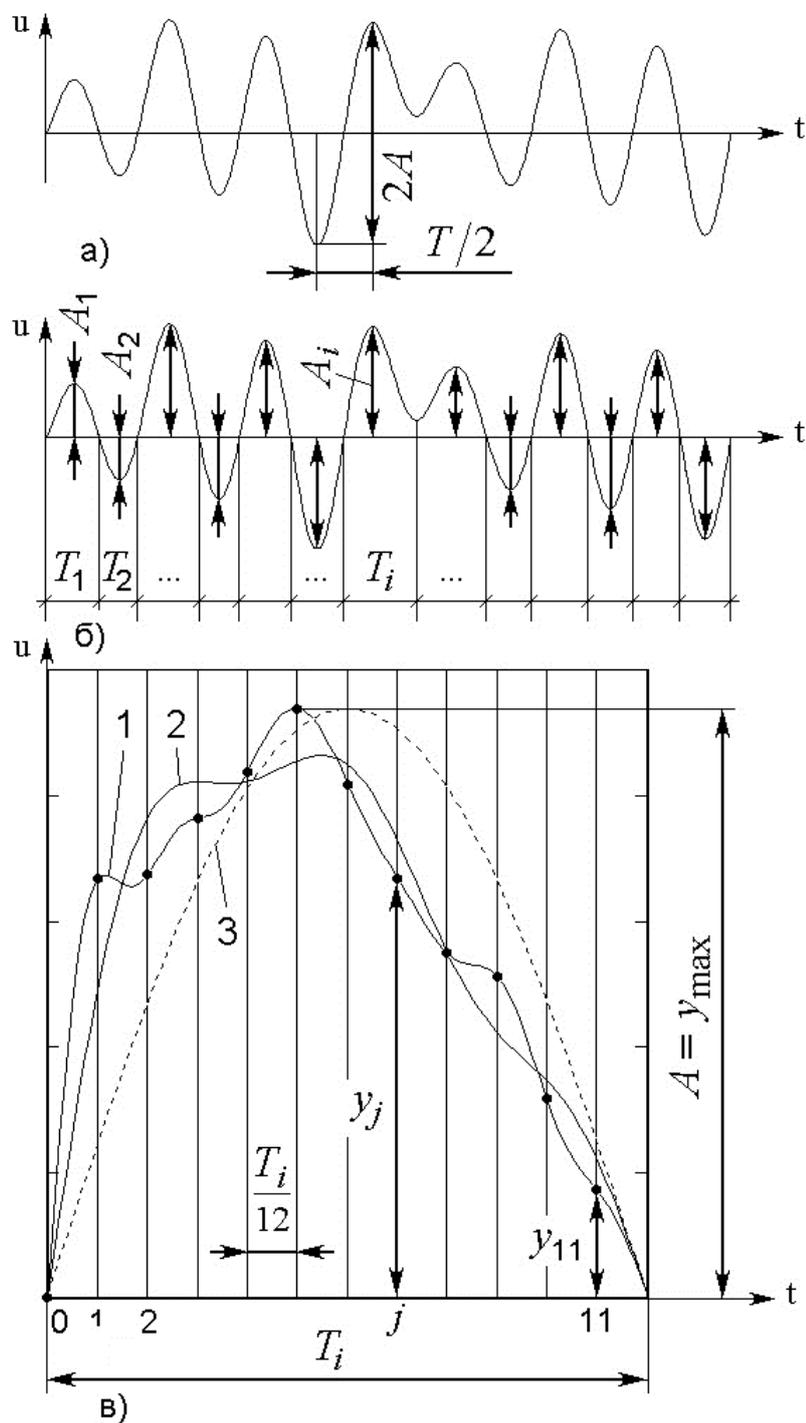


Рисунок 5.2 – Определение амплитуд и частот волнового процесса:

- а) определение максимального значения двойной амплитуды и соответствующего ему периода; б) дискретная обработка амплитуд и периодов (аппроксимация полуволнами синусоид); в) определение 12 коэффициентов ряда на каждом  $i$ -м интервале (уточненная аппроксимация пятью гармониками)

Известные способы анализа осциллограмм акустических сигналов заключаются в определении максимальной амплитуды  $A$  (рис. 5.2, а) и коэффициента затухания колебания, вычислении соотношения максимальных амплитуд в заданных частотных интервалах либо в различных измерительных каналах [55].

Для более детального контроля характеристик импульсных акустических сигналов в микропроцессорных приборах оперативного контроля и в контроллерах нижнего уровня автоматизированных систем можно применить метод, основанный на анализе визуальных или условных спектров. Для их получения производятся дискретные измерения амплитуд и периодов условных колебаний на интервалах времени, равных соответствующим периодам. Далее определяются частоты этих колебаний, и строится поле точек, являющееся основой для построения условного спектра. В отличие от ранее известного способа [55], использующего одно измерение на протяжении интервала разбиения и ручное построение поля точек (рис. 5.2, б), предложен метод, при котором изменение сигнала на каждом из временных интервалов выражается двенадцатью точками (рис. 5.2, в). Если известный способ базируется на корреляционной связи между реальным и аппроксимированным участками синусоид сигналами, то в предложенном методе используется соотношение между спектром реального апериодического сигнала и спектрами его мнимых периодических составляющих (5.6). Таким образом, контролируемый сигнал (1 на рис. 5.2, в) аппроксимируется не полуволнами синусоид (3), а участками кривых (2), содержащих по пять гармонических составляющих, что дает более высокую точность приближения.

Для разбиения сигнала на участки и выделения мнимых периодических составляющих предложено сравнивать текущее мгновенное значение сигнала с пограничными значениями зоны нечувствительности  $a_0 - \Delta TG$  (нижняя уставка) и  $a_0 + \Delta TG$  (верхняя уставка), где  $a_0$  - постоянная составляющая оцифрованного сигнала (как правило, равная величине смещения аналого-цифрового преобразователя),  $2\Delta TG$  - ширина зоны нечувствительности. Пусть имеется аппаратный либо программный компаратор  $TH1$ , устанавливающийся в единичное состояние в случае, если цифровой код, соответствующий текущему значению входного сигнала, больше верхней уставки:  $u_k > a_0 + \Delta TG$ . Компаратор  $TH2$  устанавливается в единичное состояние, если значение цифрового кода меньше нижней

уставки:  $u_k < a_0 - \Delta TG$  (рис. 5.3). Пусть выходы компараторов подключаются соответственно к входам установки ( $S$ ) и сброса ( $R$ ) аппаратного либо программного  $RS$ -триггера. Тогда начало каждого нового  $i$ -го интервала, равного периоду выделенной периодической составляющей, определяется фронтом выходного сигнала  $RS$ -триггера. Рис. 5.3 иллюстрирует работу приведенного алгоритма. Возможны также и другие способы разбиения сигнала.

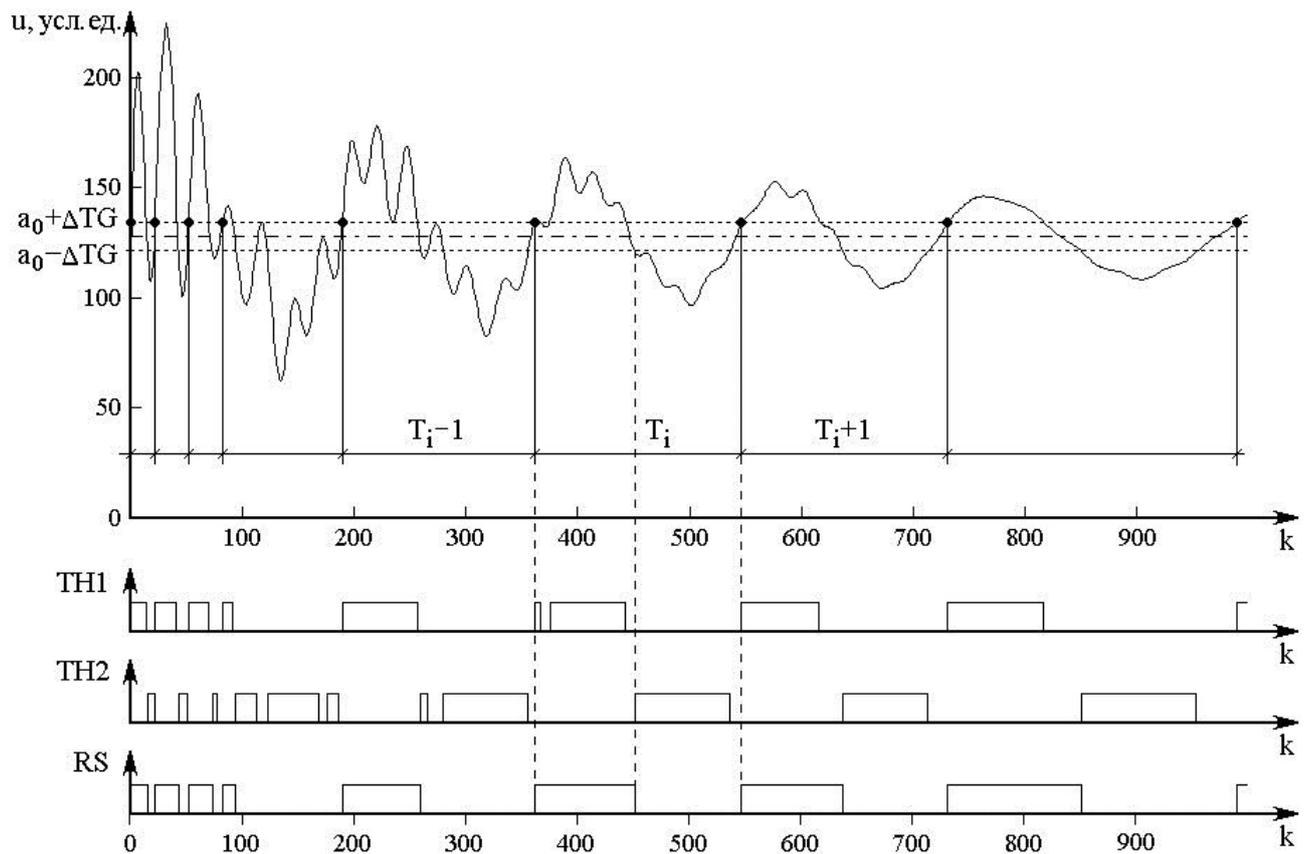


Рисунок 5.3 – Разбиение аperiodического сигнала на временные интервалы на основе алгоритма работы двух элементов сравнения  $TH1$ ,  $TH2$  и  $RS$  – триггера

Рассматривая гармонический состав выделенных периодических составляющих сигнала в соответствии с (5.6), в ряде случаев можно упростить алгоритмы цифровой обработки акустических импульсов отклика на ударное воздействие и тем самым удешевить автоматизацию контроля, уменьшив требования к производительности элементной базы контроллеров нижнего уровня автоматизированных систем. В частности, можно отказаться от применения сигнальных процессоров в пользу микроконтроллеров общего назначения. Такое решение особо эффективно в цифровых

приборах оперативного контроля. Сформулированный выше вывод и разработанный на его основе метод позволяют отдельно последовательно рассматривать гармонический состав продольной предволны, поперечных резонансных мод и изгибных низкочастотных колебаний (рис. 5.4). Для спектрального разложения мнимых периодических составляющих колебания применяется метод двенадцати ординат, что в совокупности с предложенным методом позволяет избежать операций над комплексными числами и свести вычисления в основном к целочисленному суммированию.

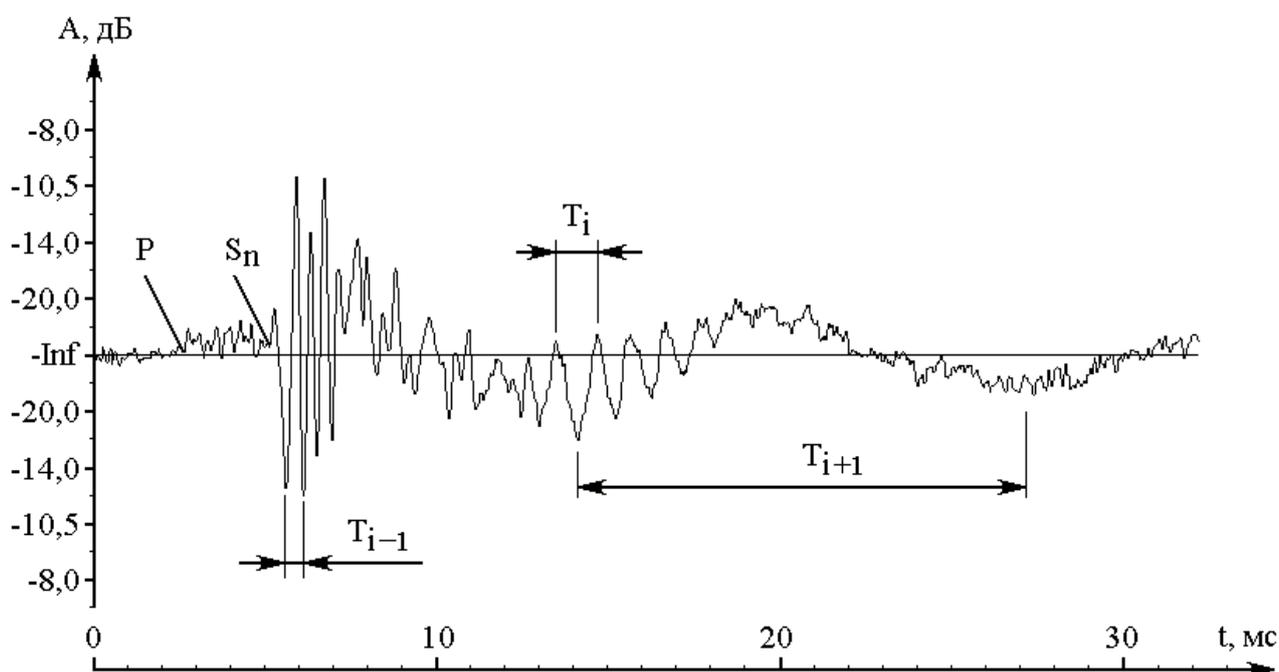


Рисунок 5.4 – Образование во времени информативных частот  $f_i = 1/T_i$  в одиночных акустических импульсах при ударном воздействии (к обоснованию метода цифровой обработки сигналов с помощью однокристалльных микроконтроллеров)

## 5.2 Особенности реализации быстрого преобразования Фурье методом двенадцати ординат для обработки данных автоматизированного виброакустического контроля в двоичном коде

При использовании метода двенадцати ординат функцию  $f(x)$  представляют в виде конечного ряда

$$y = f(x) = a_0 + \sum_{i=1}^6 a_i \cos ix + \sum_{i=1}^5 b_i \sin ix, \quad (5.7)$$

где  $a_0$  - постоянная составляющая,  $i$  - номер гармонической составляющей,  $a_i, b_i$  - коэффициенты ряда Фурье.

Так как в цифровых приборах оперативного контроля и контроллерах нижнего уровня автоматизированных систем обработка данных выполняется микропроцессорными средствами, то ранее известный метод переработан для вычислений в двоичном коде.

Значения коэффициентов ряда определяются по формулам [108]:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{12}(r_0 + l); & a_1 &= \frac{1}{6}\left(v_0 + \frac{\sqrt{3}}{2}s_1 + \frac{1}{2}s_2\right); & a_2 &= \frac{1}{6}\left(s_0 + \frac{1}{2}m\right); \\ a_3 &= \frac{1}{6}(v_0 - s_2); & a_4 &= \frac{1}{6}\left(r_0 - \frac{1}{2}l\right); & a_5 &= \frac{1}{6}\left(v_0 - \frac{\sqrt{3}}{2}s_1 + \frac{1}{2}s_2\right); \\ a_6 &= \frac{1}{12}(s_0 - m); & b_1 &= \frac{1}{6}\left(v_3 + \frac{1}{2}p_1 + \frac{\sqrt{3}}{2}p_2\right); & b_2 &= \frac{\sqrt{3}}{12}d; \\ b_3 &= \frac{1}{6}(p_1 - v_3); & b_4 &= \frac{\sqrt{3}}{12}h; & b_5 &= \frac{1}{6}\left(v_3 + \frac{1}{2}p_1 - \frac{\sqrt{3}}{2}p_2\right), \end{aligned} \quad (5.8)$$

где промежуточные переменные  $u_0, u_1, \dots, u_5$ ;  $v_0, v_1, \dots, v_5$ ;  $r_0, r_1, r_2$ ;  $s_0, s_1, s_2$ ;  $p_1, p_2$ ;  $q_1, q_2$ ;  $l, d, m, h$  рассчитываются по следующей вычислительной схеме:

$y_0$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	[8,10,12 разрядов]
$y_6$	$y_{11}$	$y_{10}$	$y_9$	$y_8$	$y_7$	
-----						
$u_0$	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$	Суммы ( $u$ ) [9,11,13]
$v_0$	$v_1$	$v_2$	$v_3$	$v_4$	$v_5$	Разности ( $v$ )
-----						
$u_0$	$u_1$	$u_2$	$v_1$	$v_2$	[9,11,13]	
$u_3$	$u_5$	$u_4$	$v_5$	$v_4$		
-----						
$r_0$	$r_1$	$r_2$	$p_1$	$p_2$	Суммы ( $r, p$ ) [10,12,14]	
$s_0$	$s_1$	$s_2$	$q_1$	$q_2$	Разности ( $s, q$ )	

$$\begin{array}{ll}
 r_1 & q_1 \\
 r_2 & q_2 \\
 \text{---} & \text{---} \\
 l & d \quad \text{Суммы } (l,d) \\
 m & h \quad \text{Разности } (m,h)
 \end{array} \quad [10,12,14] \quad [11,13,15] \quad (5.9)$$

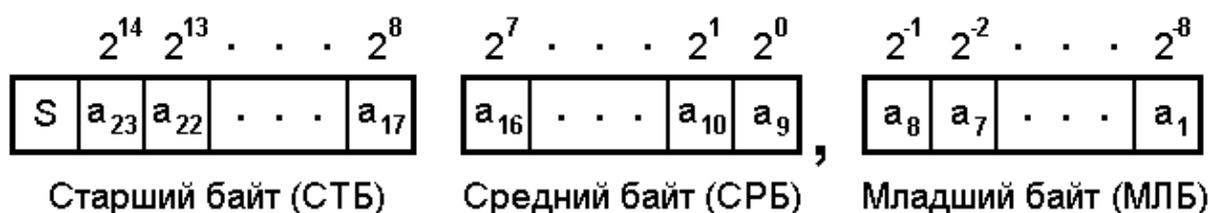
Величины, входящие в окончательные формулы, в данной схеме выделены полужирным шрифтом. В квадратных скобках приведены разрядности абсолютных величин промежуточных переменных при использовании 8-, 10- и 12-разрядных входных данных. Таким образом, максимальная разрядность целочисленных переменных составляет 15 бит, что позволяет производить промежуточные вычисления над двухбайтными операндами с использованием старшего 16-го разряда как знакового. Отрицательные числа представляются в дополнительном коде.

Как видно из (5.8), в процессе вычисления некоторых коэффициентов приходится умножать значения промежуточных величин, рассчитанных в соответствии с приведенной вычислительной схемой, на множитель  $\sqrt{3}/2$ . При выполнении этого действия целочисленные промежуточные величины преобразуются в иррациональную дробь. Для вычислений в двоичном коде множитель  $\sqrt{3}/2$  заменим числом ограниченной точности 0,8671875. При этом относительная ошибка составит 0,134 %. Все дальнейшие вычисления производятся в двоичной форме без округления или отбрасывания значащих бит, т. е. без потери точности. Дробная часть множителя  $\sqrt{3}/2$  в данном приближении выражается одним байтом (0,8671875 $d=,DEh$ ), поэтому разрядность дробной части произведения также составляет 8 бит. При этом младший значащий бит произведения будет всегда нулевым, т. к. равен нулю младший бит множителя ( $,DEh=1101110b$ ). В связи с вышесказанным, вычисления по формулам (5.8) следует выполнять в трехбайтном знаковом формате (рис. 5.5, а), причем младший байт должен выражать дробную часть числа. Размещение чисел, входящих в определяемый формат диапазон, на числовой оси показано на рис. 5.5, б. С целью ускорения обработки данных в режиме реального времени следует вычислять значения коэффициентов ряда (5.7), умноженных на масштабный коэффициент  $m_k = 6$ . В табл. 5.1

приведены диапазоны изменения величин  $m_k \cdot a_0, m_k \cdot a_1, \dots, m_k \cdot a_6$ ;  $m_k \cdot b_1, m_k \cdot b_2, \dots, m_k \cdot b_5$  при максимальной разрядности смещенных исходных данных. Как видно из таблицы, любые возможные значения коэффициентов ряда (5.7) входят в диапазон чисел, определяемый принятым трехбайтным знаковым форматом (рис. 5.5). Знаком апострофа (') в таблице отделены младшие байты, выражающие дробную часть чисел.

Таблица 5.1 – Диапазоны изменения произведений коэффициентов ряда (5.7) на масштабный коэффициент  $m_k = 6$

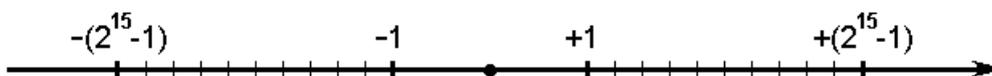
Коэффициент	$m_k \cdot a_0$	$m_k \cdot a_1$	$m_k \cdot a_2$	$m_k \cdot a_3$	$m_k \cdot a_4$	$m_k \cdot a_5$
Диапазон изменения	0... +5FFA'00h	±3BBC'44h	±3FFC'00h	±2FFD'00h	±3FFC'00h	±3BBC'44h
Коэффициент	$m_k \cdot b_5$	$m_k \cdot b_1$	$m_k \cdot b_2$	$m_k \cdot b_3$	$m_k \cdot b_4$	$m_k \cdot a_6$
Диапазон изменения	±3BBC'44h	±3BBC'44h	±377C'88h	±2FFD'00h	±377C'88h	±2FFD'00h



а)



б)



в)



г)

Рисунок 5.5 – Трехбайтный знаковый формат числа с фиксированной запятой (а); диапазон чисел, представленных принятым форматом и размещение их на числовой оси: б) дробная часть числа; в) целая часть; г) совмещенный диапазон

Первый этап операции умножения двухбайтного знакового числа на однобайтный положительный множитель  $0,8671875d$  выполняется по стандартному алгоритму побайтным перемножением, причем при работе над старшим байтом множимого его знак сохраняется в бите пользователя. После получения модуля произведения в случае отрицательного множимого к старшему байту результата прибавляется  $022h$  (рис. 5.6, а) и тем самым формируется дополнительный код результата в принятом трехбайтном формате. На рис. 5.6 обозначены:  $X_i$  - тетрада числа  $X$ ;  $X_{i+1}X_i$  - байт числа  $X$ ;  $A_4A_3A_2A_1$  - множимое;  $0DEh = .8671875d$  - множитель;  $B_4B_3B_2B_1 = A_2A_1 \times 0DEh$ ;  $D_6D_5D_4D_3D_2D_1$  - произведение в дополнительном коде (МЛБ – дробная часть числа). Таким образом, стандартный алгоритм умножения оптимизирован для конкретного значения множителя, форматов операндов и результата [108].

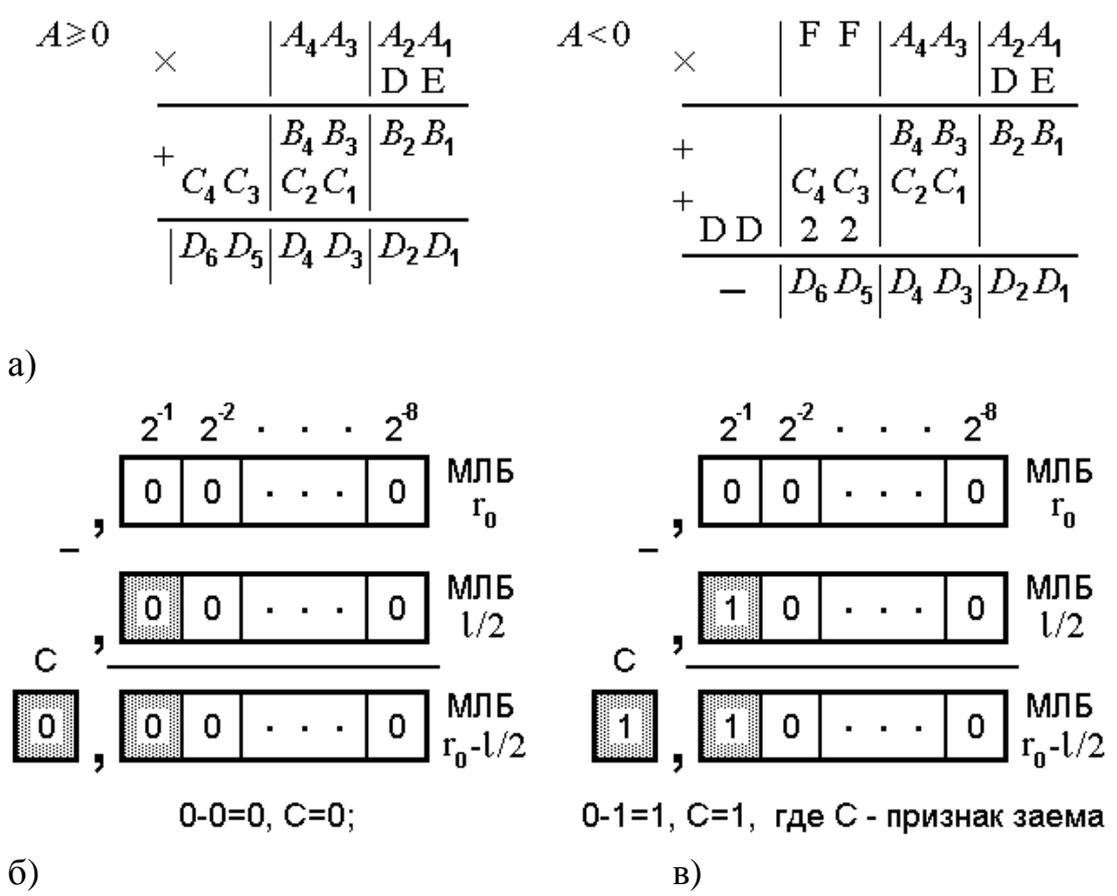


Рисунок 5.6 – Умножение двухбайтного знакового множимого на множитель  $0,8671875d = .8671875d$  (а); формирование младшего байта результата вычитания при вычислении коэффициента  $m_k \cdot a_4$ , если старший бит младшего байта числа  $l/2$  равен нулю (б); единице (в)

---

При использовании 12-разрядных исходных данных модуль величины  $r_0 + l$  выражается двумя байтами, т. е. происходит заполнение бита знака. Поэтому, в зависимости от используемой разрядности  $N$  исходных данных, изменяется алгоритм расчета коэффициента  $a_0$ : при  $N < 12$  заполнения знакового бита не происходит и расчет производится по формуле  $m_k \cdot a_0 = \frac{1}{2}(r_0 + l)$ ; при

$N = 12$  применяется формула  $m_k \cdot a_0 = \frac{r_0}{2} + \frac{l}{2}$ . Обе формулы дают одинаковый результат, но в последнем случае перед суммированием производится уменьшение разрядности целой части каждого из слагаемых на один бит, что предупреждает заполнение бита знака. Данное решение применяется и для вычисления коэффициента  $a_6$ :

$$m_k \cdot a_6 = \frac{1}{2}(s_0 - m) \text{ при } N < 12; m_k \cdot a_6 = \frac{s_0}{2} - \frac{m}{2} \text{ при } N = 12.$$

### **5.3 Моделирование процесса обработки виброакустических сигналов предложенными методами и оценка их точности**

Для проверки работоспособности предложенных методов цифровой обработки геофизических акустических сигналов, оценки их точности и информативности составлена программная модель, реализующая разработанные алгоритмы спектрального анализа в среде Mathcad 7 Professional на персональной ЭВМ. Данный пакет выбран для моделирования потому, что запись операторов и программных блоков в нем наиболее приближена к стандартной общепринятой форме записи математических выражений, что обеспечивает наглядность модели и удобство работы с ней. Результаты моделирования представляются в численном и графическом виде.

Модель позволяет обрабатывать массивы мгновенных значений сигналов, заданные в текстовых файлах. Так как аналого-цифровые преобразователи имеют смещенную передаточную характеристику, то оцифрованный сигнал имеет постоянную составляющую  $a_0$ , вычисляемую как среднее арифметическое всех значений массива. С помощью программного блока (рис. 5.7, а) можно определить количество пиков (полуволн) сигнала, по которому на основе критерия квазистационарности колебательных систем и

сформулированного в разделе 4 вывода можно судить о нагруженности массива и элементов крепи.

Разбиение сигнала на временные интервалы осуществляется программным блоком (рис. 5.7, б) на основе алгоритма, приведенного в разделе 5.1. Мгновенные значения сигнала, содержащиеся в векторе  $AY$ , сравниваются с пороговыми значениями  $a_0 - \Delta TG$  и  $a_0 + \Delta TG$ , что позволяет определить момент вступления продольной или нормальной резонансной волны в зависимости от ширины зоны нечувствительности  $2\Delta TG$ . Выходной переменной программного блока является двухмерный массив данных  $BY$ , каждый столбец которого содержит мгновенные значения сигнала одного периода  $i$ -й периодической составляющей.

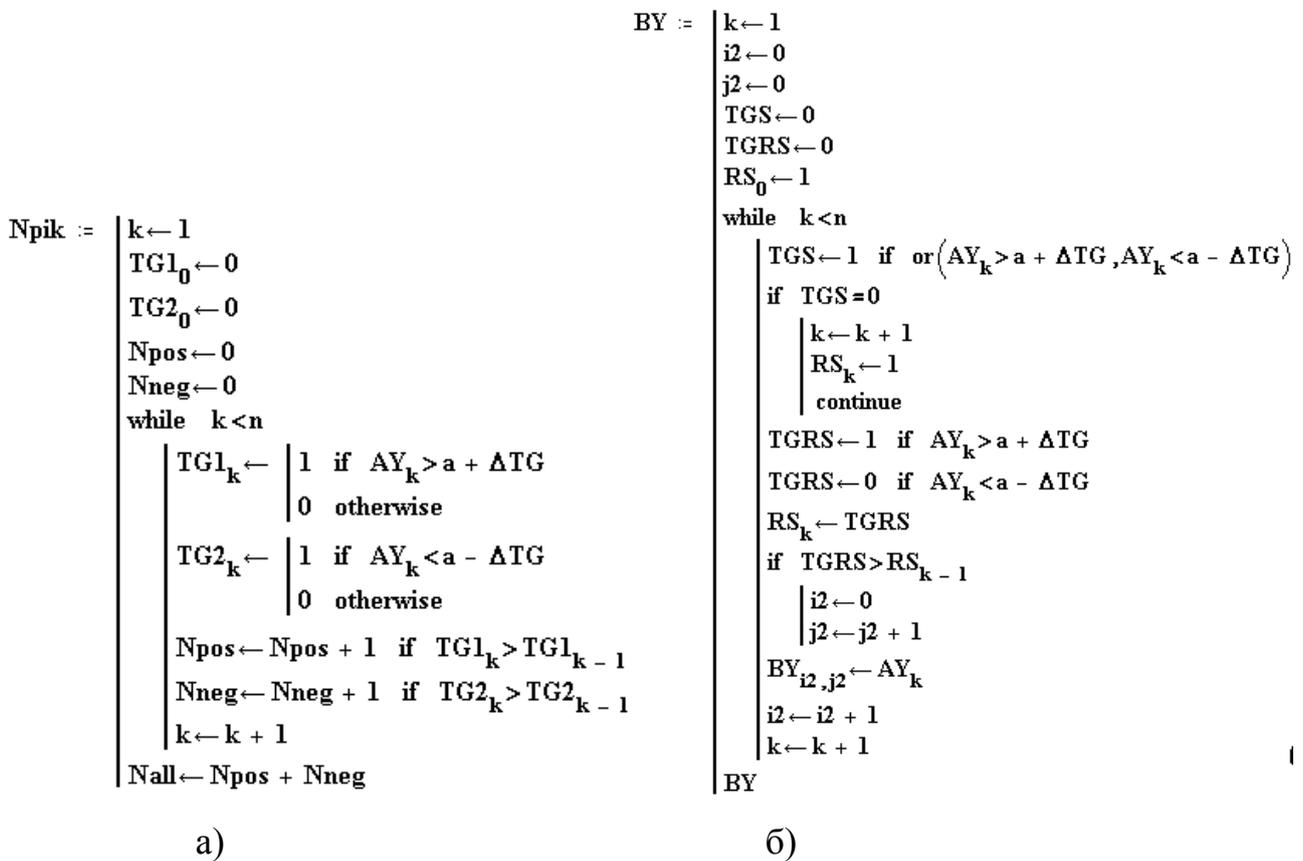


Рисунок 5.7 – Программные блоки определения количества пиков (полуволн) сигнала (а) и разбиения сигнала на мнимые периодические составляющие (б) математической модели

Количество столбцов массива  $Nint$  равняется числу выделенных временных интервалов, а количество строк  $Nel$  - числу отсчетов (выборок) сигнала наиболее низкочастотной мнимой периодической составляющей. Столбцы значений остальных периодических

составляющих автоматически дополняются незначащими нулями до размера  $Nel$ . Далее матрица  $BY$  разбивается по столбцам на  $Nint$  векторов  $(CY)_i$ . Для удаления незначащих нулей применяется заданный математический оператор, оформленный в виде программного блока (рис. 5.8, а). Необходимость задания нового оператора обусловлена тем, что в теле программного блока вектор либо массив данных не может быть индексированной переменной. Заданный математический оператор позволил упростить структуру программного блока и систему индексации переменных в модели. После удаления незначащих нулей размер каждого  $i$ -го вектора  $(CY)_i$  становится равным числу  $Nel_i$  выборок мгновенных значений сигнала  $i$ -й периодической составляющей, причем суммарное количество элементов всех векторов  $(CY)_i$  сравнивается с размером исходного вектора  $AY$  за вычетом количества выборок сигнала до вступления продольной или нормальной резонансной волны.

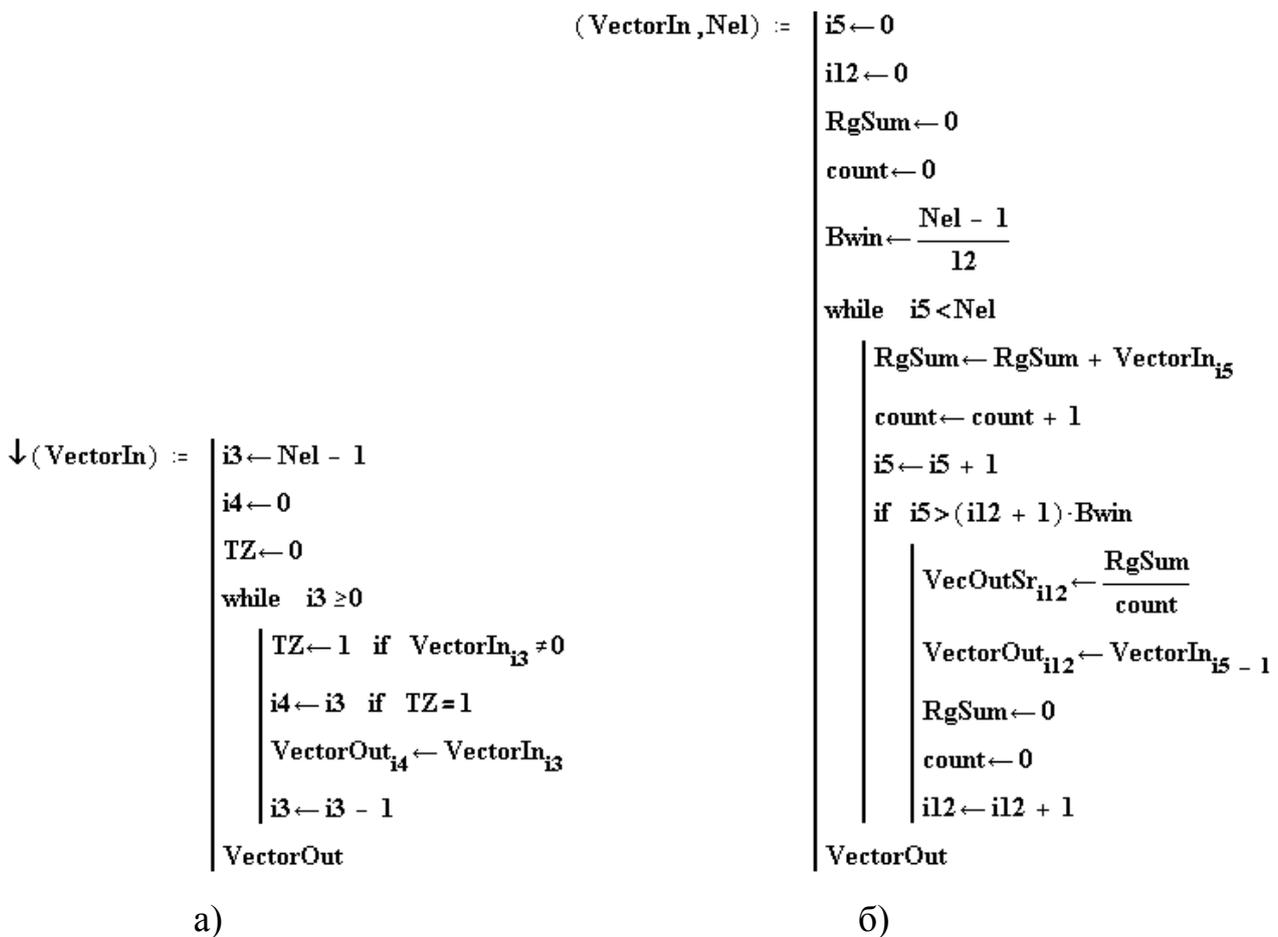


Рисунок 5.8 – Программные блоки удаления незначащих нулей (а), усреднения сигнала и перераспределения индексов (б) математической модели

Спектральный анализ выделенных мнимых периодических составляющих выполняется быстрым преобразованием Фурье методом двенадцати ординат. Входной вектор такого преобразования должен содержать двенадцать мгновенных значений сигнала, равномерно распределенных по оси времени на протяжении периода  $T_i$  мнимой периодической составляющей (рис. 5.2, в). Так как в общем случае  $Nel_i \neq 12$ , то необходимо выполнить преобразование векторов  $(CY)_i$ . Модель позволяет преобразовывать векторы как непосредственным перераспределением индексов, так и усреднением сигнала с шириной окна  $Nel_i/12$ . Первый способ применяется для моделирования на персональной ЭВМ процесса обработки сигнала в реальном времени цифровым прибором низкой вычислительной производительности. При этом теоретически возможно не соблюдение условий теоремы Котельникова о дискретизации, т. е. для задания высших гармоник, присутствующих в заданном вектором  $(CY)_i$  сигнале, необходимо более двенадцати ординат. Однако на практике, благодаря разбиению исходного сигнала на мнимые периодические составляющие, каждый вектор  $(CY)_i$ , независимо от типа датчика и исследуемого объекта, содержит только две полуволны сигнала, принимаемые за первую гармонику, а влияние гармоник с номером выше шестой незначительно. Второй способ преобразования применяется для моделирования работы цифровых устройств, вычислительной мощности которых достаточно для промежуточного усреднения сигнала в пределах временных интервалов  $T_i$ . Перераспределение индексов массивов в модели осуществляется с помощью заданного нового математического оператора, оформленного в виде программного блока (рис. 5.8, б).

Для проверки работоспособности модели, моделируемых методов и алгоритмов спектрального анализа были обработаны массивы мгновенных значений тестовых сигналов (периодического монохроматического незатухающего, периодического монохроматического экспоненциально затухающего, периодического зашумленного экспоненциально затухающего синусоидального сигналов, сигналов с дискретным и плавающим изменением частоты, сигналов со сложным спектральным составом, в т. ч. меандра, белого шума и т. д.). Также были исследованы сигналы виброударного прозвучивания бетонных и гипсовых плит (плоско-параллельных

---

структур) с применением датчиков разного типа, ударников разной массы при различных базах прозвучивания.

Как показали результаты моделирования, предложенные методы обработки акустических сигналов отклика на ударное воздействие эффективны, а алгоритмы работоспособны. В зависимости от уровня шумов и наводок, ширину зоны нечувствительности  $2\Delta TG$  следует выбирать от 3 до 15 %. При ее изменении происходит незначительное смещение точек на итоговой спектрограмме. Относительная ошибка вычисления амплитуд гармонических составляющих зависит от формы входного сигнала и лежит в пределах от 7 % (ошибка быстрого преобразования Фурье методом двенадцати ординат) до 20 % (несоответствие визуального и реального спектров). Однако предложенный метод пошагового спектрального анализа выделенных мнимых периодических составляющих является информативным даже при максимальной погрешности вычислений, так как позволяет отдельно рассматривать спектры продольной предварительной волны, нормальных резонансных и изгибных колебаний блоковых и плоско-параллельных структур, что дает возможность оценивать их геометрические размеры и нагруженность. Динамическое смещение расчетных точек спектрограммы соответствует сдвигу максимумов спектральной плотности сигнала и позволяет следить за изменением частот и амплитуд гармонических составляющих (рис. 5.9, 5.10, а).

Исследование с помощью программной модели сигналов виброударного прозвучивания защемленной на торцах бетонной плиты показало, что при ударном воздействии в плите возникают нормальные резонансные колебания, частота которых зависит от ее толщины и массы ударника (рис. 5.10, б, в, г). В плоском волноводе можно возбудить любую из мод с частотами, кратными частоте основной моды. При массе ударника 0,5 кг в плите преимущественно возникают более высокочастотные колебания второй моды (1600-2000 Гц), постепенно затухающие и переходящие в низкочастотную первую моду (800-1000 Гц), причем при больших базах прозвучивания понижается отношение амплитуд высокочастотных мод к амплитуде первой моды, что объясняется большим затуханием реальных нормальных высокочастотных волн вдоль оси распространения колебания по сравнению с низкочастотными (рис. 5.10, б, в). В случае ударного воздействия на бетонную плиту грузом, масса которого меньше 0,5 кг, изгибные колебания практически не возникают (их амплитуда намного меньше

амплитуды нормальных поперечных колебаний). Они наиболее легко регистрируются в точках пучков при возникновении стоячих волн для изгибных колебаний (рис. 5.10, б) в точках, равноудаленных от мест закрепления плиты, или в точках наиболее удаленных от места одностороннего закрепления плиты.

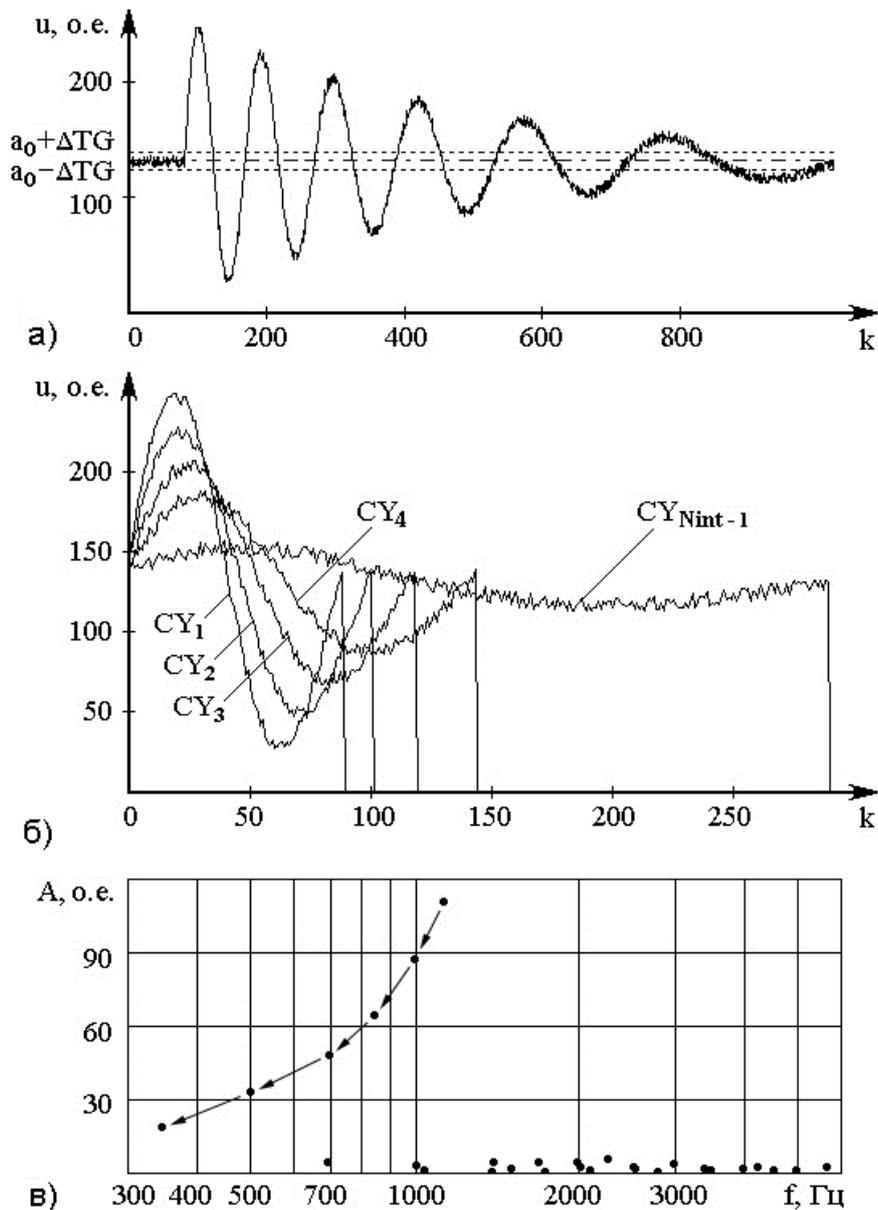


Рисунок 5.9 – Работа модели при исследовании экспоненциально затухающего сигнала плавно увеличивающейся частоты: а) осциллограмма сигнала; б) разбиение на временные интервалы; в) динамическая

В случае применения ударника массой 2 кг и более в бетонной плите возникают нормальные резонансные колебания в основном первой моды, частота которых зависит только от толщины и свойств материала плиты (рис. 5.10, г). Отсутствие мод более высоких

порядков гарантирует однозначность определения толщины плоскопараллельной структуры, поэтому важно стандартизировать технологию проведения оперативного виброакустического (ударноволнового) контроля (например, в виде руководства, включающего базы данных, нормирующие тип датчика, массу ударника, схему и базы прозвучивания для конкретных контролируемых объектов.

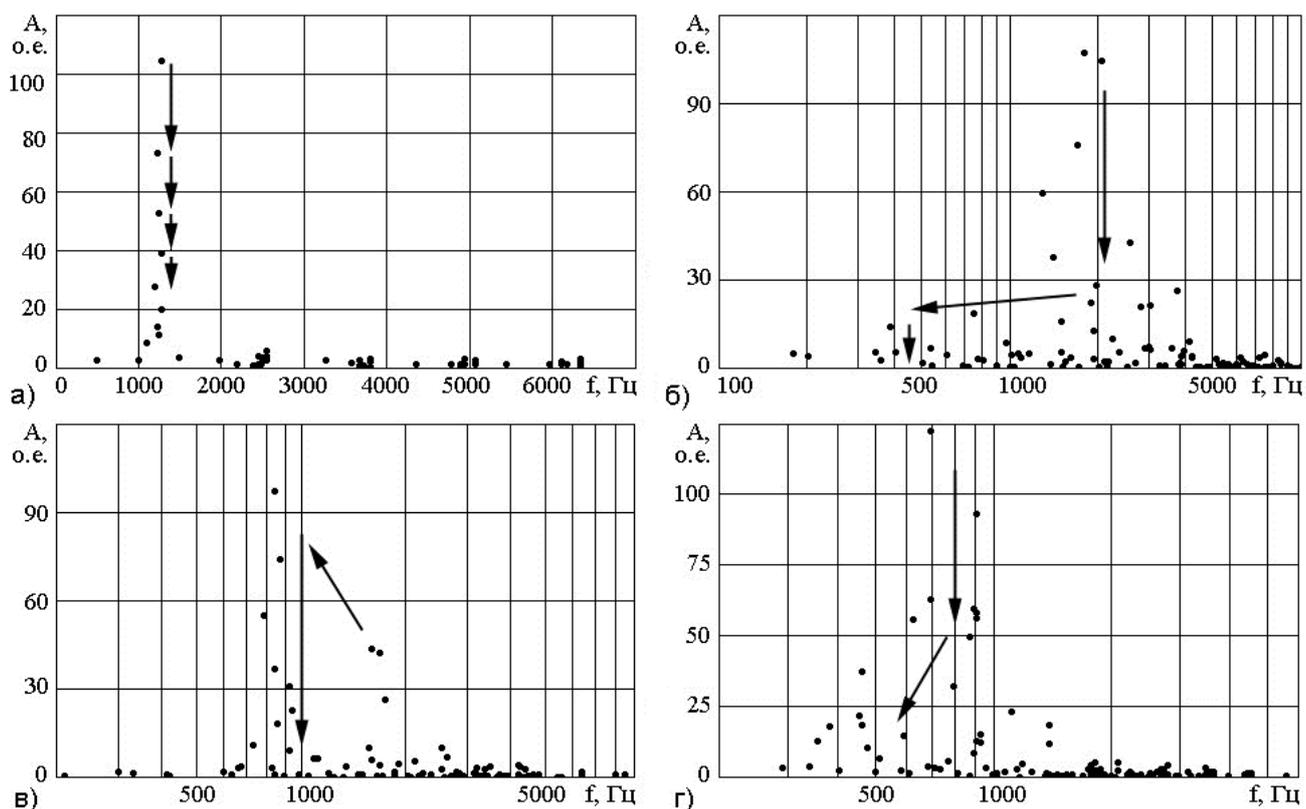


Рисунок 5.10 – Спектрограммы зашумленного экспоненциально затухающего синусоидального сигнала (а); сигналов виброакустического прозвучивания защемленной на торцах бетонной плиты датчиком ПН19МС: б) база 4 м, масса ударника 0,5 кг; в) база 2 м, масса ударника 0,5 кг; г) база 4 м, масса ударника 2 кг

По истечении отрезка времени, равного 3-7 периодам нормальных поперечных колебаний первой моды (800-1000 Гц на рис. 5.10, г, 5.11, б, г), в плите возникают изгибные колебания (100-450 Гц), по частоте которых можно судить о протяженности плоскопараллельной структуры. Распределение амплитуд изгибных колебаний вдоль плоскопараллельной или блоковой структуры массива дает информацию о местах ее повышенного или ослабленного механического контакта с соседними блоками и элементами массива.

В случае если плита заземлена (закреплена) с трех сторон, все линии заземления (закрепления) лежат в плоскости плиты и любые две из них взаимно перпендикулярны, изгибные колебания не возникают, либо их амплитуда намного меньше амплитуды нормальных поперечных колебаний (рис. 5.11, а, в).

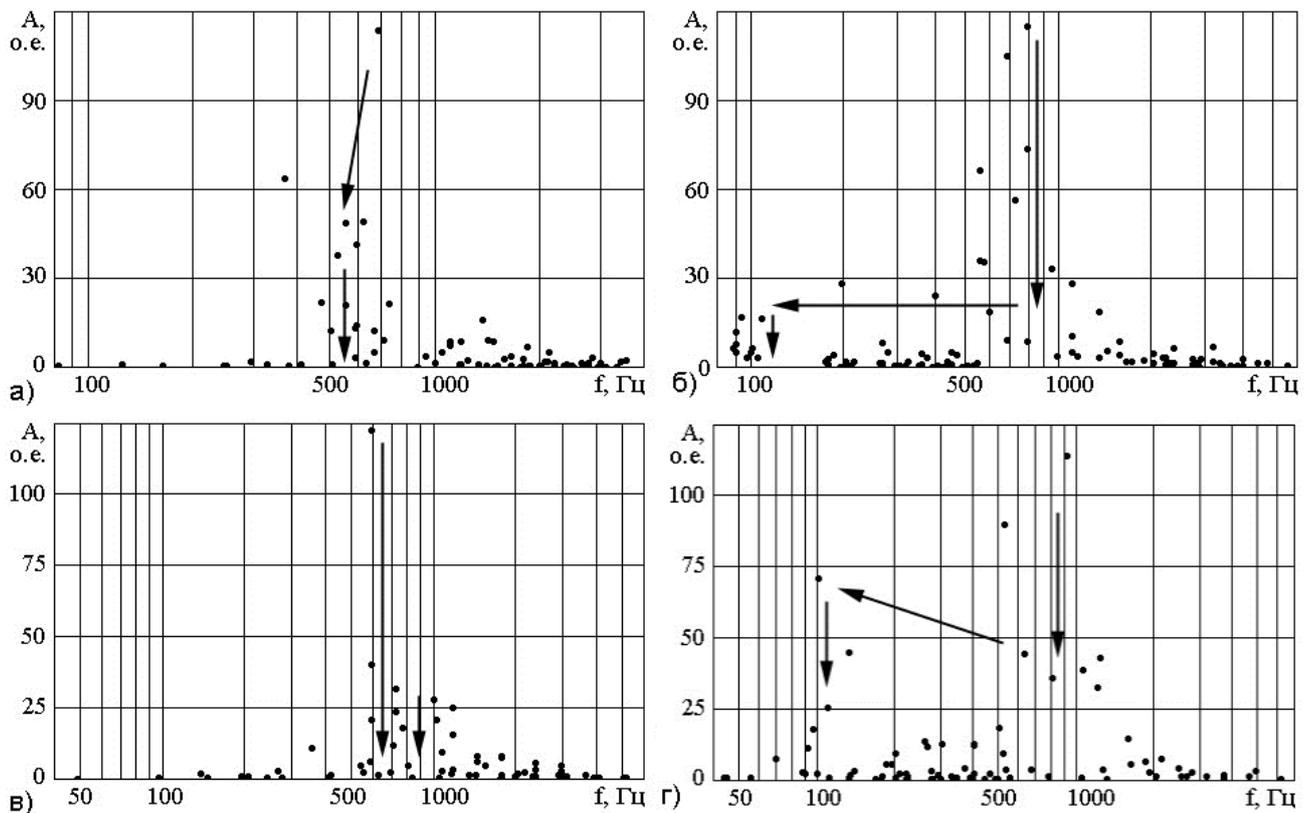


Рисунок 5.11 – Спектрограммы сигналов виброакустического прозвучивания гипсовой и бетонной плит: а) гипс, датчик ПЗ1МС, база 2 м, масса ударника 0,5 кг; б) бетон, датчик ПЗ1МС, база 4 м, масса ударника 2 кг; в) гипс, датчик СВ-20ТС, база 2 м, масса ударника 0,5 кг; г) бетон, датчик СВ-20ТС, база 4 м, масса ударника 2 кг

Таким образом, разработан, проверен с помощью математического моделирования и опробован метод цифровой обработки одиночных акустических импульсов, например, отклика на ударное воздействие, заключающийся в автоматическом построении спектрограмм методом двенадцати ординат, оптимизированным для вычислений в двоичном коде, и отличающийся тем, что с целью исключения потери наиболее опасных низкочастотных составляющих спектра, микропроцессор последовательно производит циклы обработки от высоких частот к низким до фонового снижения уровня сигнала. Кроме того, разработан и опробован метод определения

---

комплексного частотного показателя импульсных сигналов, заключающийся в разбиении затухающих апериодических колебаний на временные интервалы, в пределах каждого из которых изменение мгновенного значения отклонения принимается за один период мнимого незатухающего колебательного процесса.

## **5.4 Автоматизированная обработка результатов измерений**

### **5.4.1 Исследование технологических процессов проведения горных выработок методами математической статистики**

Породный массив является неоднородной средой по своему составу, структуре, текстуре и свойствам. Это значительно усложняет его математическое описание, алгоритмизацию и программирование конкретных горнотехнических задач, что объективно определяет необходимость описания физических явлений и процессов горного производства методами больших чисел, т.е. методами математической статистики. При этом статистические модели должны учитывать характерные особенности, присущие как объекту исследований, так и методам измерений.

Разработана программа Su-Stat, позволяющая автоматически вычислять основные статистические характеристики массивов случайных чисел, строить гистограммы распределения случайной величины, линейную и нелинейные (параболическую, гиперболическую, степенную, экспоненциальную) регрессионные модели с оценкой их корректности по коэффициентам детерминации при исследовании объектов горнотехнического профиля [98]. Программа соответствует международному стандарту “Worldwide Standard for Technical Calculations” и может быть использована как приложение в интегрирующей среде для математических вычислений MathConnex при автоматизированном контроле и управлении.

Программа обеспечивает считывание массивов значений случайных величин из файлов, автоматическое определение длин выборок и масштабирование графиков, а также предоставляет сервисные средства редактирования в оболочке Mathcad 7 Professional. Операторы программы имеют вид математических формул, что в совокупности с наличием Windows-совместимых средств редактирования позволяет переносить их в документы MS'Office, что упрощает составление отчетных документов.

Минимальная конфигурация ЭВМ, поддерживающая разработанную программу: процессор 80486, 8МВ RAM-памяти, 20МВ свободного места на жестком диске для инсталляции оболочки, SVGA-графический адаптер, операционная система – Windows 95.

Программа статистической обработки состоит из следующих разделов: “Математическое моделирование при исследовании горнотехнических объектов”, “Построение гистограмм распределения случайной величины”, “Линейный парный регрессионный анализ”, “Нелинейный парный регрессионный анализ” и “Вывод результатов вычислений”.

Одним из основных отличий от ранее известных программ является использование встроенной функции  $dt(n, p)$  для определения значения обратного процентного распределения Стьюдента в точке  $p$  при объеме выборки  $n$ . Это позволяет отказаться от табулирования функции и задавать требуемые значения вероятности при расчете доверительных интервалов для статистических оценок. Наличие встроенной функции  $dt(n, p)$  также упрощает программный блок исключения грубых погрешностей и повышает достоверность результатов его работы.

Блок предварительной обработки выборки выполнен в виде отдельной подпрограммы. Блок предназначен для отсева ложных значений, вносимых системами сбора и обработки информации, вызванных сбоями в аналого-цифровых преобразователях, зашумлением сигнала в линиях связи и т. п. Ложные значения в выборке либо автоматически не учитываются, либо заменяются некоторыми аппроксимированными значениями.

Известны следующие основные способы отсева грубых погрешностей: фильтрация, усреднение (сглаживание), отсев значений, доверительная вероятность которых меньше допустимой, либо не попадающих в определенный доверительный интервал. Применение цифровой фильтрации целесообразно в системах реального времени в тех случаях, когда частотные области спектра помех относительно постоянны и не пересекаются с частотными областями спектра полезного сигнала, например при отфильтровывании помех, наводимых силовыми линиями промышленной частоты или высокочастотных шумов. Так как программа предназначена для решения широкого класса задач горного профиля при исследовании физических процессов и не

ориентирована на обработку сигналов в режиме реального времени, то в ней предусмотрена возможность выбора: линейного сглаживания массива значений по трем и пяти точкам, нелинейного - по семи точкам, сглаживания методом плавающей медианы с выбираемой шириной окна. Во всех схемах неявно принято, что истинные значения имеют плавный характер изменения во времени, а ложные - резкий. Расчетные формулы реализации перечисленных алгоритмов приведены в таблице 5.2 [43].

Таблица 5.2 – Расчетные формулы сглаживания статистических выборок, примененные в программе

Метод сглаживания	Расчетные формулы
Линейное, по трем точкам	$\bar{x}_0 = (5x_0 + 2x_1 - x_2)/6;$ $\bar{x}_i = (x_{i-1} + x_i + x_{i+1})/3, \quad \text{при } 1 \leq i \leq n-1;$ $\bar{x}_n = (5x_n + 2x_{n-1} - x_{n-2})/6.$
Линейное, по пяти точкам	$\bar{x}_0 = (3x_0 + 2x_1 + x_2 - x_4)/5;$ $\bar{x}_1 = (4x_0 + 3x_1 + 2x_2 + x_3)/10;$ $\bar{x}_i = (x_{i-2} + x_{i-1} + x_i + x_{i+1} + x_{i+2})/5, \quad \text{при } 2 \leq i \leq n-2,$ $\bar{x}_{n-1} = (x_{n-3} + 2x_{n-2} + 3x_{n-1} + 4x_n)/10;$ $\bar{x}_n = (3x_n + 2x_{n-1} + x_{n-2} - x_{n-4})/5.$
Нелинейное, по семи точкам	$\bar{x}_0 = (39x_0 + 8x_1 - 4(x_2 + x_3 - x_4) + x_5 - 2x_6)/42;$ $\bar{x}_1 = (8x_0 + 19x_1 + 16x_2 + 6x_3 - 4x_4 - 7x_5 + 4x_7)/42;$ $\bar{x}_2 = (-4x_0 + 16x_1 + 19x_2 + 12x_3 + 2x_4 - 4x_5 + x_6)/42;$ $\bar{x}_i = (7x_i + 6(x_{i+1} + x_{i-1}) + 3(x_{i+2} + x_{i-2}) - 2(x_{i+3} + x_{i-3}))/21, \quad \text{при } 3 \leq i \leq n-3;$ $\bar{x}_{n-2} = (x_{n-6} - 4x_{n-5} + 2x_{n-4} + 12x_{n-3} + 19x_{n-2} + 16x_{n-1} - 4x_n)/42;$ $\bar{x}_{n-1} = (4x_{n-6} - 7x_{n-5} - 4x_{n-4} + 6x_{n-3} + 16x_{n-2} + 19x_{n-1} + 8x_n)/42;$ $\bar{x}_n = (-2x_{n-6} + 4x_{n-5} + x_{n-4} - 4x_{n-3} - 4x_{n-2} + 8x_{n-1} + 39x_n)/42.$
Метод плав. медианы	Используется встроенный оператор $medsmoth(M, del)$ , где M - массив, содержащий значения выборки, del - ширина окна

Однако перечисленные алгоритмы могут оказывать искажающее влияние на все значения сигнала в выборке, а экстраполяционные методы сглаживания - привести к накоплению ошибки. Кроме того, схемы сглаживания не всегда эффективны при отсеке единичных (точечных) ложных значений, характерных при потере отдельных

значащих бит в цифровых системах, при вводе сигналов автоматизированными аналого-цифровыми преобразователями диаграмм или при вводе сигналов методом сканирования. В связи с этим дополнительно использован способ для обработки выборок контролируемых параметров и отсева ложных значений. Способ основан на сравнении величины изменения исследуемого параметра  $x$  за время шага выборки  $\Delta t$  с максимальным значением модуля темпа изменения параметра  $V_{\max}$ .

Способ имеет конкретный физический смысл, базируется на динамических свойствах исследуемых объектов и измерительных систем. Значение  $x_i$  параметра считается истинным, если выполняются условия

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{\min} \leq x_1 \leq x_{\max} \\ \left| \frac{x_i - x_{i-1}}{\Delta t} \right| \leq \left| \frac{dx}{dt} \right| = V_{\max}, \end{array} \right. \quad (5.10)$$

где  $x_{\min}$  и  $x_{\max}$  - минимально и максимально возможные значения параметра,  $x_i$  - значение параметра  $x$  в момент времени  $t_i, i = 1 \dots n$ ,  $n$  - объем выборки.

Ложные значения параметра (не удовлетворяющие условию (5.10)) в общем случае заменяются аппроксимирующим значением, вычисляемым по формуле

$$x_i = x_{i-1} \pm V_{\max} \cdot \Delta t. \quad (5.11)$$

Данный метод отсева грубых погрешностей показал высокую эффективность при предварительной обработке выборок временных сигналов, полученных методами аналого-цифрового преобразования графиков.

При исследовании геомеханической системы или объекта предлагается выполнять автоматизированную статистическую обработку массивов данных двух контролируемых параметров, из числа многих параметров поочередно выявлять взаимозависимые и наиболее изменяющиеся, которые в дальнейшем используются для критериальной оценки устойчивости системы или объекта.

Программа включена в качестве приложения в методические руководства для решения конкретных горнотехнических и гидротехнических задач [98].

---

## 5.4.2 Спектральный анализ виброакустических сигналов, в том числе представленных графически

При изучении физических процессов горного производства часто приходится производить обработку сигналов, представленных в графическом виде, например в тех случаях, когда для записи сигналов используются осциллографические шлейфы с фотоносителями, самописцы, ультразвуковые регистрирующие приборы и т. п. Наиболее эффективным способом ввода графической информации в ЭВМ с целью последующей ее обработки является сканирование.

Разработаны алгоритм и программа (в оболочке Mathcad 7 Professional) перевода файлов графических форматов в текстовые файлы \*.dat мгновенных значений сигнала. Программа соответствует международному стандарту “Worldwide Standard for Technical Calculations” и может использоваться как приложение в интегрирующей среде для математических вычислений MathConnex. Программа позволяет: преобразовывать файлы цветного изображения графика сигнала в файлы монохромного черно-белого изображения (при этом могут задаваться пределы обработки степеней затемнения) с возможным уничтожением осевых линий, надписей и масштабной сетки по критерию цвета; компенсировать неточности, связанные с недостаточной разрешающей способностью сканирующего устройства и возможными ошибками сканирования; уничтожать осевые линии и линии масштабной сетки по критериям горизонтальности/вертикальности, непрерывности и относительной длины; сохранять результаты всех промежуточных преобразований; производить спектральный анализ исследуемого сигнала. Программа реализует широко применяемые графические форматы.

Оператор “READBMP(file)” программы возвращает двухмерный массив  $M(x_{i,j})$ , вмещающий черно-белое представление изображения, содержащегося в файле file, где  $x_{i,j}$  - число от 0 до 255, соответствующее “уровню серого”  $i, j - \langle$ ” пикселя (пиксель - элементарный объект растрового изображения; отношение абсолютных размеров графика к размеру пикселя определяет величину разрешающей способности оцифрованного графика). Преобразование массива элементов  $x_{i,j}$  в одномерный массив мгновенных значений  $y_j$  сигнала производится по формуле

$$y_j = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \delta(x_{i,j},0) \cdot (n-i+1)}{\sum_{i=0}^{n-1} \delta(x_{i,j},0)}, \quad (5.12)$$

где  $\delta(a,b)$  - символ Кронекера (1, если  $a = b$ , и 0, если  $a \neq b$ ,  $a$  и  $b$  - целочисленные выражения),  $n$  - число строк матрицы  $M(x_{i,j})$ .

Если при преобразовании необходимо выделять элементы изображения по цвету, то используется арифметико-логическое выражение

$$y_j = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} (a_1 \leq x_{i,j} < a_2) \cdot (n-i+1)}{\sum_{i=0}^{n-1} (a_1 \leq x_{i,j} < a_2)}, \quad (5.13)$$

где  $a_1, a_2$  - граничные значения яркости пикселя, соответствующие цвету точек графика.

Для правильной интерпретации результатов последующих вычислений необходимо определить динамический и частотный диапазоны исследуемого сигнала, которые в случае графического его представления зависят от разрешающей способности раstra изображения графика. Как видно из рис. 5.12, а, минимальная амплитуда сигнала фиксируется на графике двумя развернутыми по вертикали пикселями ( $n_{A_{\min}} = 2$ ) и, с учетом масштаба  $m_y$  по оси ординат, составляет  $A_{\min} = n_{A_{\min}} \cdot m_y = 2m_y$ . Максимальная амплитуда  $A_{\max}$  фиксируется всеми пикселями столбца графика ( $n_{A_{\max}} = N$ ) и составляет, следовательно,  $A_{\max} = n_{A_{\max}} \cdot m_y = N \cdot m_y$ . Таким образом, динамический диапазон вычисляется по формуле

$$D = 20 \lg \frac{A_{\max}}{A_{\min}} = 20 \lg(N/2), \quad (5.14)$$

где  $N$  - число строк графика в случае полной его развертки по вертикали. Частотный диапазон исследуемого сигнала определяется разрешающей способностью раstra изображения графика по оси

абсцисс. Период сигнала максимальной частоты  $T_{f_{\max}}$  задается четырьмя пикселями, развернутыми по горизонтали  $m_{f_{\max}} = 4$  (см. рис. 5.12, б) и, с учетом масштаба времени  $m_t$ , составляет  $T_{f_{\max}} = m_{f_{\max}} \cdot m_x = 4m_x$ . Период сигнала минимальной частоты равен всей длине графика в пикселях  $m_{f_{\min}} = M$  (в случае полной развертки сигнала по горизонтали) и составляет, следовательно,  $T_{f_{\min}} = m_{f_{\min}} \cdot m_x = M \cdot m_x$ . Однако в любом случае динамический и частотный диапазоны ограничены соответствующими параметрами измерительного тракта, с помощью которого был получен обрабатываемый график сигнала.

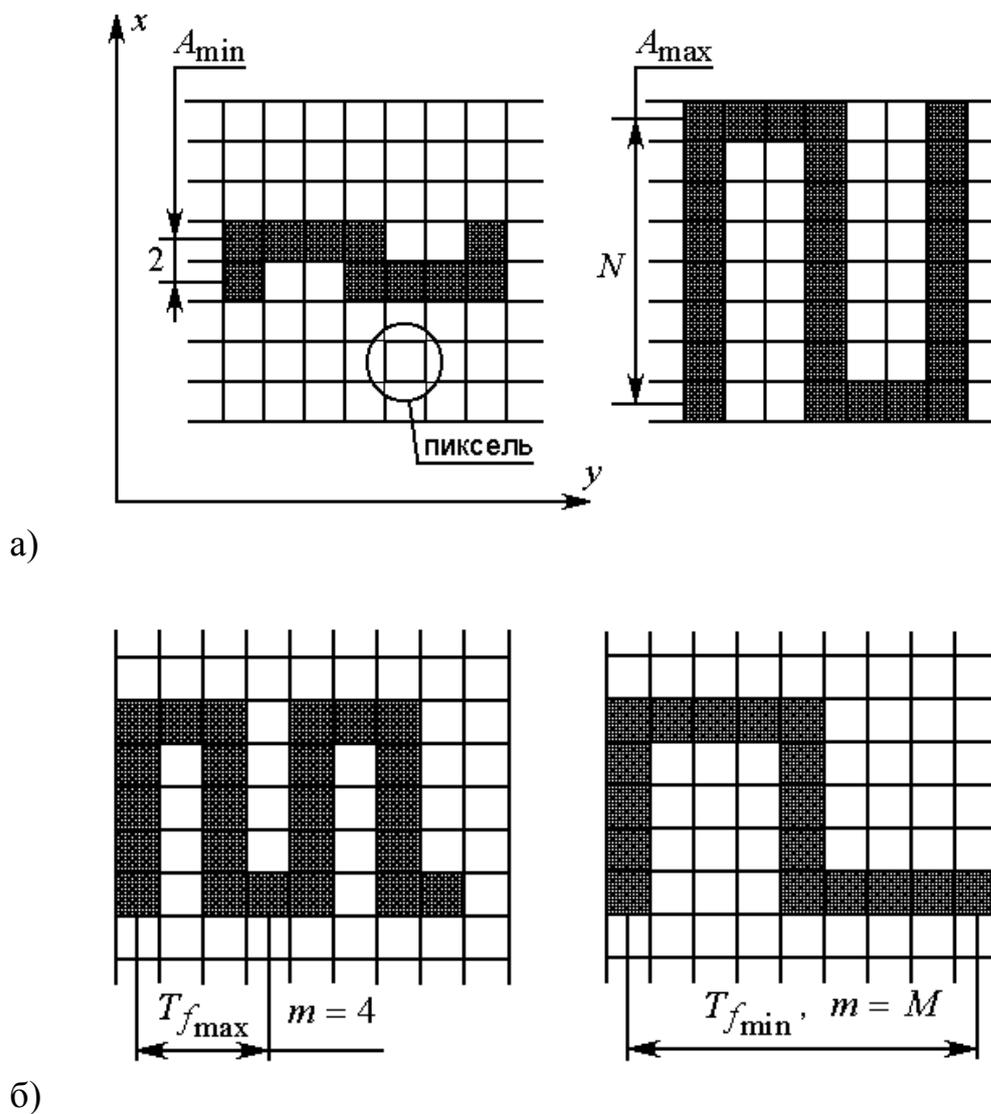


Рисунок 5.12 – Определение динамического (а) и частотного (б) диапазонов сигнала, представленного в графическом виде

Для компенсации неточностей и ошибок сканирования в программе предусмотрена возможность уточнения значений сигнала методами линейного сглаживания по трем и пяти точкам, нелинейного сглаживания по семи точкам, а также сглаживания методом плавающей медианы с выбираемой шириной окна. Результаты сглаживания можно оценить визуально путем сравнения графиков исходного и уточненного сигналов. Как показала практика, линейное сглаживание по трем точкам и нелинейное по семи можно применять во всех случаях при ширине графика большей 300 пикселей при отсутствии серьезных ошибок сканирования. В случае наличия больших искажений сигнала (по визуальной оценке) применяется сглаживание по пяти точкам либо сглаживание методом плавающей медианы, однако при этом (а также когда длина выборки не превышает 300) необходимо учитывать влияние сглаживания на гармонический состав сигнала.

Блок спектрального анализа позволяет получать комплексные спектры, амплитуды и фазы гармонических составляющих, рассчитывать спектральную плотность, сортировать вектора спектров по возрастанию амплитуд гармоник. Все результаты могут быть представлены в графическом и численном виде.

### **5.5 Выводы по разделу**

Установлено, что затухающий аperiodический сигнал можно представить как суперпозицию конечного числа произведений мнимых периодических сигналов на смещенные единичные прямоугольные импульсы с длительностями, равными периодам соответствующих периодических сигналов. Спектр такого сигнала является суммой сверток прямых преобразований Фурье мнимых периодических сигналов и прямоугольных импульсов, что принципиально позволяет автоматизировать его контроль на основе спектров выделенных периодических составляющих.

Разработаны и обоснованы методы цифровой обработки одиночных акустических импульсов с помощью микропроцессорных средств, заключающиеся в автоматическом построении спектрограмм оптимизированным для вычислений в двоичном коде методом двенадцати ординат путем последовательной циклической обработки сигнала от высоких частот к низким разбиением на временные интервалы, в пределах каждого из которых изменение мгновенного

---

значения отклонения принимается за один период мнимого незатухающего колебательного процесса.

Выполнено математическое моделирование автоматизированной цифровой обработки сигналов, полученных виброакустическим прозвучиванием физических моделей структурных единиц крепи и породного массива (различных плит, блоков) и реальных геофизических сигналов при оперативном контроле устойчивости массива. Для разработанных методов погрешность вычисления коэффициентов ряда Фурье лежит в пределах 7-20 %, что является удовлетворительным для решения задач горнотехнического профиля. По сравнению с ранее известными, методы являются высокоинформативными, т. к. позволяют отдельно распознавать продольные волны, нормальные поперечные и изгибные колебания и определять их амплитудные и частотные показатели.

На основе программы автоматизированной статистической обработки информации предложен метод исследований, заключающийся в поочередном выявлении из числа многих параметров двух взаимозависимых и наиболее быстроизменяющихся, которые в дальнейшем используются для критериальной оценки устойчивости геомеханической системы или объекта. Программа является составной частью «Руководства по геофизической диагностике состояния системы «крепь-породный массив» вертикальных стволов».

Разработаны и опробованы метод, алгоритм и программа автоматического преобразования файлов графических форматов, содержащих растровое представление сигналов и функциональных зависимостей, в файлы данных текстового формата, содержащие одномерные векторы мгновенных значений сигналов или табличные задания функций.

---

## 6 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

---

### 6.1 Разработка аналого-цифровых приборов-индикаторов оперативного контроля системы типа «крепь-массив»

Электронные приборы, контроллеры нижнего уровня автоматизированной системы и комплектующие датчики должны удовлетворять следующим требованиям: 1) стабильность в работе во времени и в требуемом диапазоне климатических условий; 2) отсутствие чувствительности к помехам электромагнитных, электростатических, магнитных и акустических полей; 3) динамический диапазон контролируемого параметра должен обеспечивать возможность регистрации рабочего уровня, подлежащего контролю; 4) электронный прибор-индикатор должен легко калиброваться с помощью стандартных серийных генераторов и осциллографов [4, 63].

Разработаны приборы-индикаторы оперативного контроля на основе экономичного эквалайзера и пиковых светодиодных индикаторов, выполненных на микросхемах с однополярным питанием. Основное назначение приборов – контроль крепи шахт, взаимодействия рабочих органов горнопроходческих и горнодобывающих машин с породным массивом. Кроме этого, возможен контроль устойчивости конструкций, металлических и бетонных опор инженерных сооружений, натяжения арматуры и тросов, нагруженности балок, элементов конструкций и их взаимодействия. Приборы отличаются простотой конструкции, питание: батарея 9В или аккумуляторный блок питания с преобразователем напряжения. Светодиодные индикаторы – модульного типа, в зависимости от назначения прибора может использоваться один или несколько модулей.

Отличительной особенностью приборов является применение в качестве блока разделительных фильтров пяти- или десятиполосного эквалайзера. Это позволяет выбирать и задавать требуемую амплитудно-частотную характеристику измерительного тракта в зависимости от объекта контроля и типа датчиков (см. раздел 5.3). Эквалайзер состоит из десяти (в общем случае) регулируемых фильтров, с помощью которых можно изменять коэффициент передачи усилительного устройства в достаточно узких полосах

---

частот, что позволяет получить сложную форму амплитудно-частотной характеристики. Это увеличивает избирательность прибора по сравнению с ранее известными и дает возможность выделить воздействие того или иного механизма, характеризующегося своим спектром колебаний, на опоры, фундаменты или другие механизмы, а также абстрагироваться в процессе измерений от влияния помех и фоновых вибраций. Так, например, при виброакустическом контроле крепей шахт, строительных конструкций, фундаментов опор ЛЭП и т. п. диапазон измерений составляет 30...16000 Гц. Однако контролируемая частота выбирается в зависимости от конкретной задачи контроля.

Схемы всех фильтров эквалайзера одинаковы и различаются только номиналами частото задающих элементов. Они представляют собой активные фильтры второго порядка с крутизной ската горба амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) - 12 дБ на октаву. Выбор такой конструкции обусловлен тем, что фильтры первого порядка (6 дБ на октаву) не позволяют обеспечить требуемую избирательность. Фильтры третьего порядка сложны и требуют источника сигнала со сравнительно малым выходным сопротивлением, что не всегда возможно при параллельном соединении нескольких фильтров [76, 122].

Известные схемы эквалайзеров имеют высокие качественные показатели, но требуют двуполярного напряжения питания, малоэкономичны, либо содержат большое количество деталей и, следовательно, не обладают достаточной отказоустойчивостью [12, 122]. Применение специализированных микросхем КА2223 позволило значительно упростить схемотехнику устройства (рис. 6.1). Один корпус КА2223 содержит пять операционных усилителей и потребляет ток 4-7 мА от однополярного источника питания напряжением 5-15 В. Диапазон рабочих частот эквалайзера 20-20000 Гц, коэффициент передачи 1, диапазон регулировки коэффициента передачи  $\pm 12$  дБ. В приборах также используются эквалайзеры с аналогичными параметрами, построенные на специализированных микросхемах ВА3822, включенных по типовой схеме (рис. 6.2, а).

В зависимости от назначения эквалайзеров, возможны различные схемы включения блока регулируемых фильтров: с плавно регулируемой амплитудно-частотной характеристикой (рис. 6.3, а); с фиксированной АЧХ сложной формы (например, для выравнивания

общей амплитудно-частотной характеристики всего измерительного тракта, рис. 6.3, б); с дискретно изменяемой АЧХ (рис.6.3, в, г).

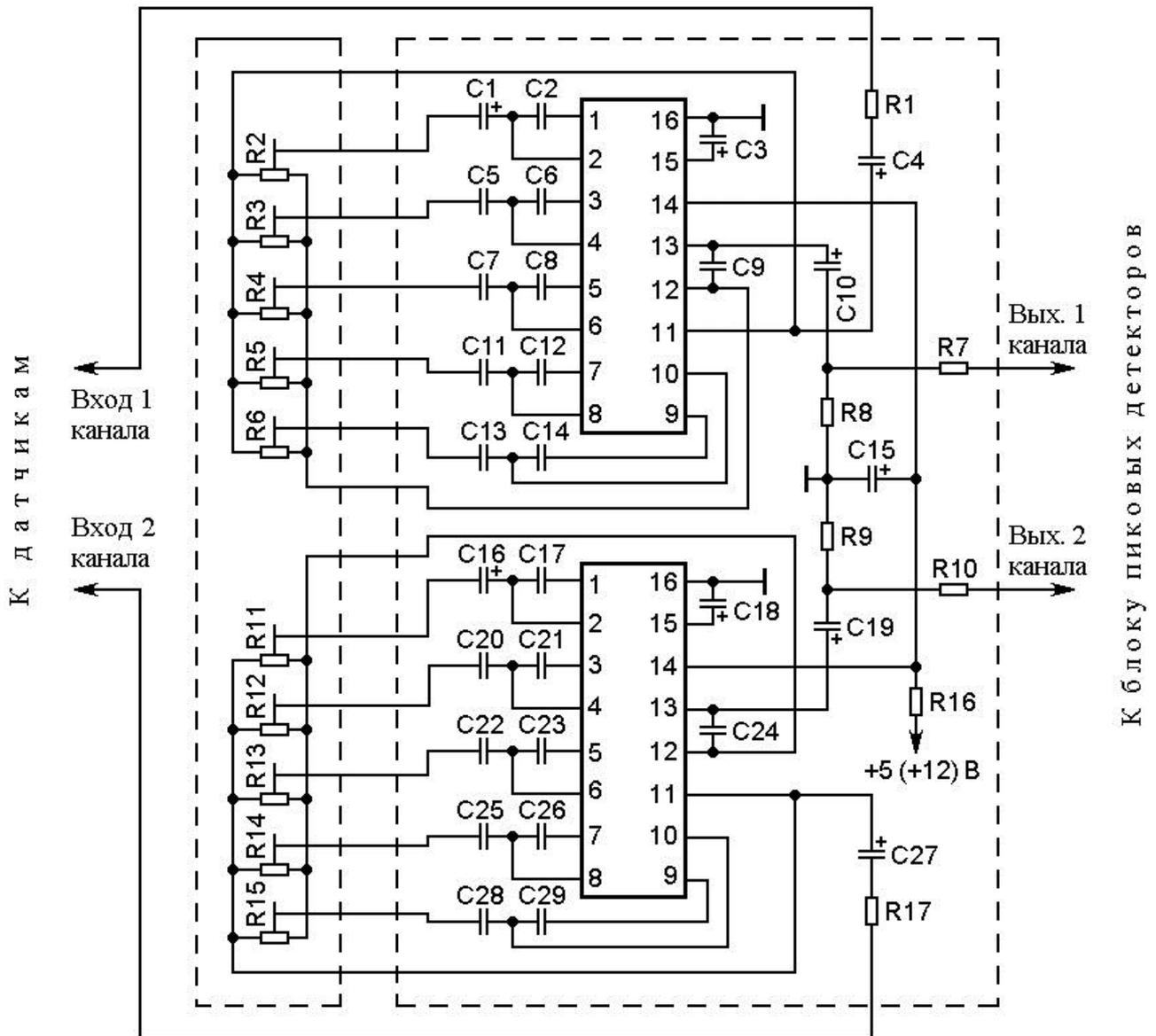


Рисунок 6.1 – Принципиальная схема блока регулируемых фильтров на специализированных микросхемах операционных усилителей

Выделенные активными фильтрами эквалайзера составляющие входного сигнала поступают на пиковые детекторы. Время интегрирования и время обратного хода индикатора определяется емкостями и сопротивлениями времязадающих элементов детекторов. Последнее выбирается из условий хорошей “считываемости” показаний прибора оператором при высокой оперативности контроля.

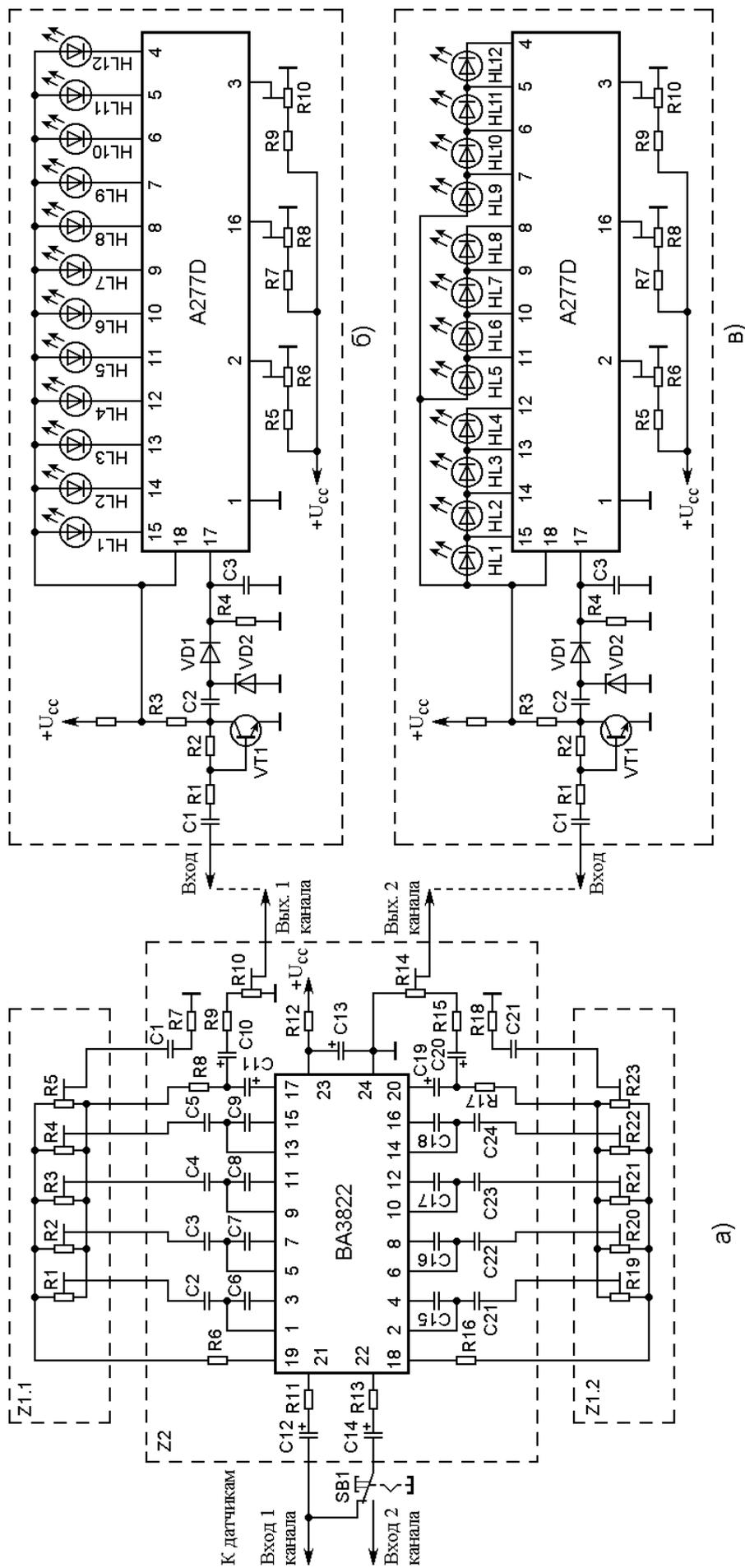


Рисунок 6.2 – Принципиальная схема одно- двухканального прибора-индикатора виброакустического контроля с возможностью выбора амплитудно-частотной характеристики: а) один десятиполосный или два пятиполосных эквалайзера; б) светодиодный индикатор «бегущая точка»; в) светодиодный индикатор «шкала с заполнением» (R6 – регулировка яркости свечения, R8 – регулировка уровня зажигания первого светодиода, R10 – регулировка уровня зажигания последнего светодиода)

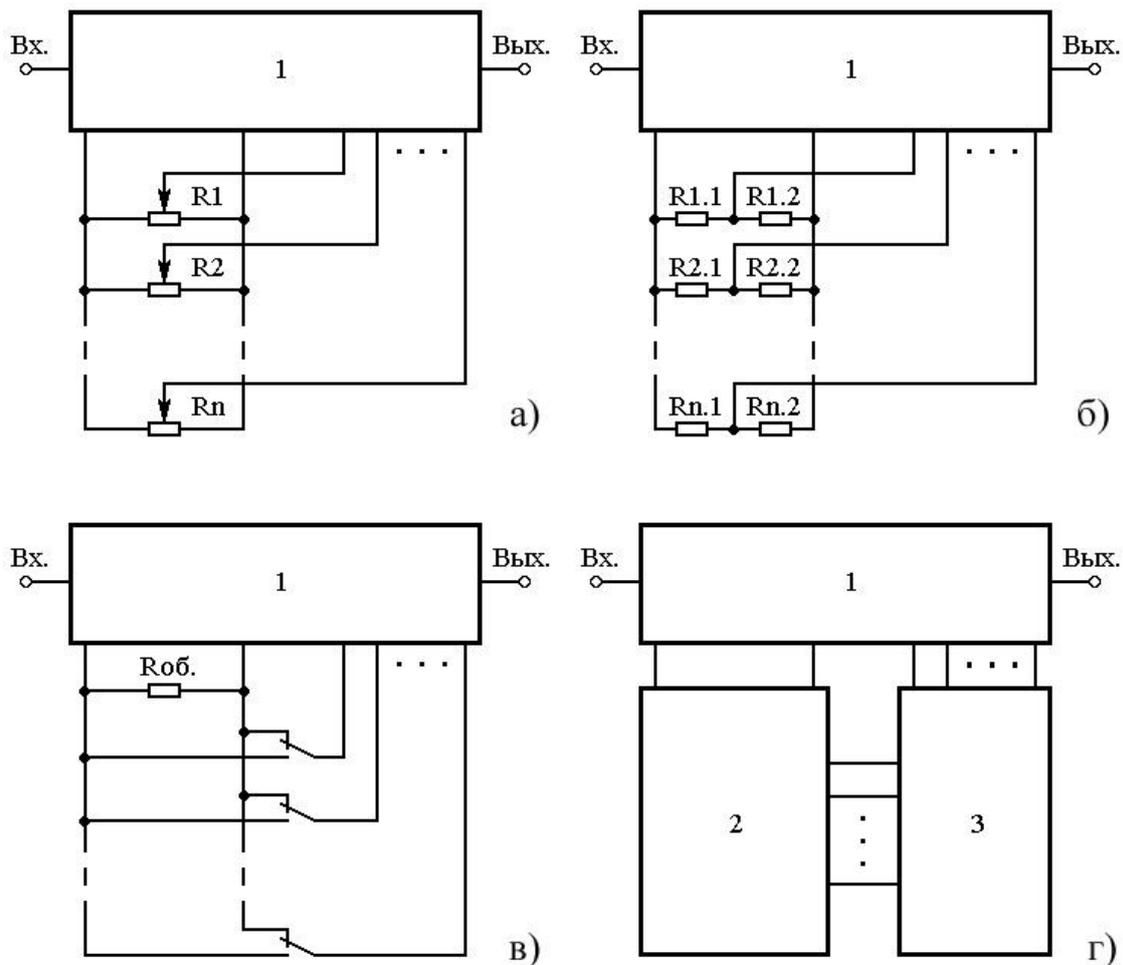


Рисунок 6.3 – Схемы включения эквалайзера в приборах оперативного контроля и контроллерах нижнего уровня автоматизированной системы (1 – плата эквалайзера, 2 – резисторная микросборка, 3 – цифровой коммутатор): а) с плавно регулируемой амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ); б) с фиксированной АЧХ сложной формы; в) и г) – с дискретно изменяемой АЧХ

Для спектральных индикаторов лабораторного и настольного исполнения простые диодные детекторы неприемлемы, поскольку имеют довольно выраженную нелинейность и порог срабатывания на уровне 0,3-0,5 В, что приводит к сужению динамического диапазона устройства. В таких случаях применяют двухполупериодные пиковые детекторы на основе операционных усилителей. Уровень напряжения срабатывания такого узла 2-3 мВ, динамический диапазон 40-60 дБ [122]. Однако в автономном приборе для качественного (оценочного) оперативного виброакустического контроля применение таких детекторов нецелесообразно ввиду большой потребляемой мощности операционными усилителями. В связи с этим разработан прибор-индикатор, в котором применены пассивные пиковые индикаторы на полупроводниковых диодах (VD1), а в

---

качестве предварительных усилителей использованы транзисторы (VT1), рис. 6.2.

В качестве аналого-кодowego преобразователя могут применяться: вакуумные люминесцентные и жидкокристаллические индикаторы со встроенными схемами управления, а также специализированные интегральные микросхемы (ИМС) линейной или логарифмической шкалы с применением светодиодных индикаторов.

Недостатками вакуумных люминесцентных индикаторов являются необходимость использования преобразователя напряжения для питания индикатора и низкая виброустойчивость [86], что ограничивает применение таких индикаторов в портативных приборах с автономным питанием, несмотря на высокую яркость свечения и малую потребляемую мощность. Была рассмотрена возможность применения жидкокристаллического индикатора ИЖЦ 54-4/7 со встроенной схемой управления, в связи с низкой контрастностью изображения в условиях недостаточной освещенности применение жидкокристаллических индикаторов не целесообразно (индикатор применен в приборе «ДИКОН» для работы в полевых условиях).

Таким образом, для экспресс-контроля в подземных условиях наиболее рациональным является применение специализированных ИМС аналого-кодowych преобразователей, выходы которых допускают по нагрузочной способности непосредственное подключение к ним светодиодных индикаторов [12, 115, 128]. Параметры интегральных микросхем аналого-кодowych преобразователей приведены в табл. 6.1.

В приборе (рис. 6.2) в качестве аналого-кодowego преобразователя применена интегральная микросхема A277D. Для повышения экономичности устройства использован режим индикации “светящаяся точка”, при котором в любой момент времени светится только один светодиод шкалы, соответствующий уровню измеряемого сигнала. Применение внутреннего стабилизатора в ИМС обеспечивает требуемую точность измерений при понижении напряжения аккумуляторных батарей. Предусмотрена возможность отдельной регулировки чувствительности прибора (R1) и динамического диапазона контроля входного сигнала (R8, R10). Желаемая яркость свечения светодиодов

выбирается оператором в зависимости от уровня внешней освещенности (Р6, рис. 6.2, б, в).

Таблица 6.1 – Параметры интегральных микросхем аналого-кодовых преобразователей

Тип микросхемы	К-во уровней индикации	Режим индикации	Шкала	Дополнительные возможности	Страна или фирма-изготовитель
К1003ПП1	12	ШЗ	Логарифм.	-	СНГ
К1003ПП2	16	СТ	Логарифм.	-	
К1003ПП3	10	СТ	Логарифм.	-	
LM3914	10	СТ/ШЗ	Линейная	Каскадирование	National Semiconductors Corp.
LM3915	10	СТ/ШЗ	Линейная	Каскадирование	
LM3916	10	СТ/ШЗ	Логарифм.	-	
U237В	5	ШЗ	Линейная	Каскадиров. с U247В	AEG-Telefunken Corp.
U257В	5	ШЗ	Логарифм.	Каскадиров. с U267В	
U247В	5	ШЗ	Линейная	Каскадиров. с U237В	
U267В	5	ШЗ	Логарифм.	Каскадиров. с U257В	
A277D (аналог UAA180)	12	СТ/ШЗ	Линейная	Регулируемая яркость свечения индикатора	Германия

*Примечание:* СТ – режим «светящаяся точка», ШЗ – режим «шкала с заполнением»

Разработана схема десятиполосных разделительных нерегулируемых фильтров на малопотребляющих микросхемах счетверенных операционных усилителей К1401УД2А (рис. 6.4).

Схема на порядок уменьшает энергопотребление полосовых фильтров индикаторов состояния кровли ИСК-1 и ИСК-1Ш (искробезопасное исполнение) и позволяет перейти на питание прибора от аккумуляторов ЗКНГК-11Д к аккумуляторам ЗКНГК-3,5Д или к гальваническим элементам, тем самым улучшив экономические и эргономические показатели. Вдвое уменьшено количество микросхем в плате фильтров, исключены корректирующие емкости без ухудшения параметров фильтров. Амплитудно-частотные характеристики фильтров приведены на рис. 6.5. Для прибора ИСК-1 разработана также схема аналого-цифрового блока индикации на основе однокристального микроконтроллера с флэш-памятью Atmel 89C51 (рис. 6.6). Применение микромощного аналого-

цифрового преобразователя позволило расширить динамический диапазон измерения в 1,6 раза и обеспечить автоматическое переключение диапазонов измерения.

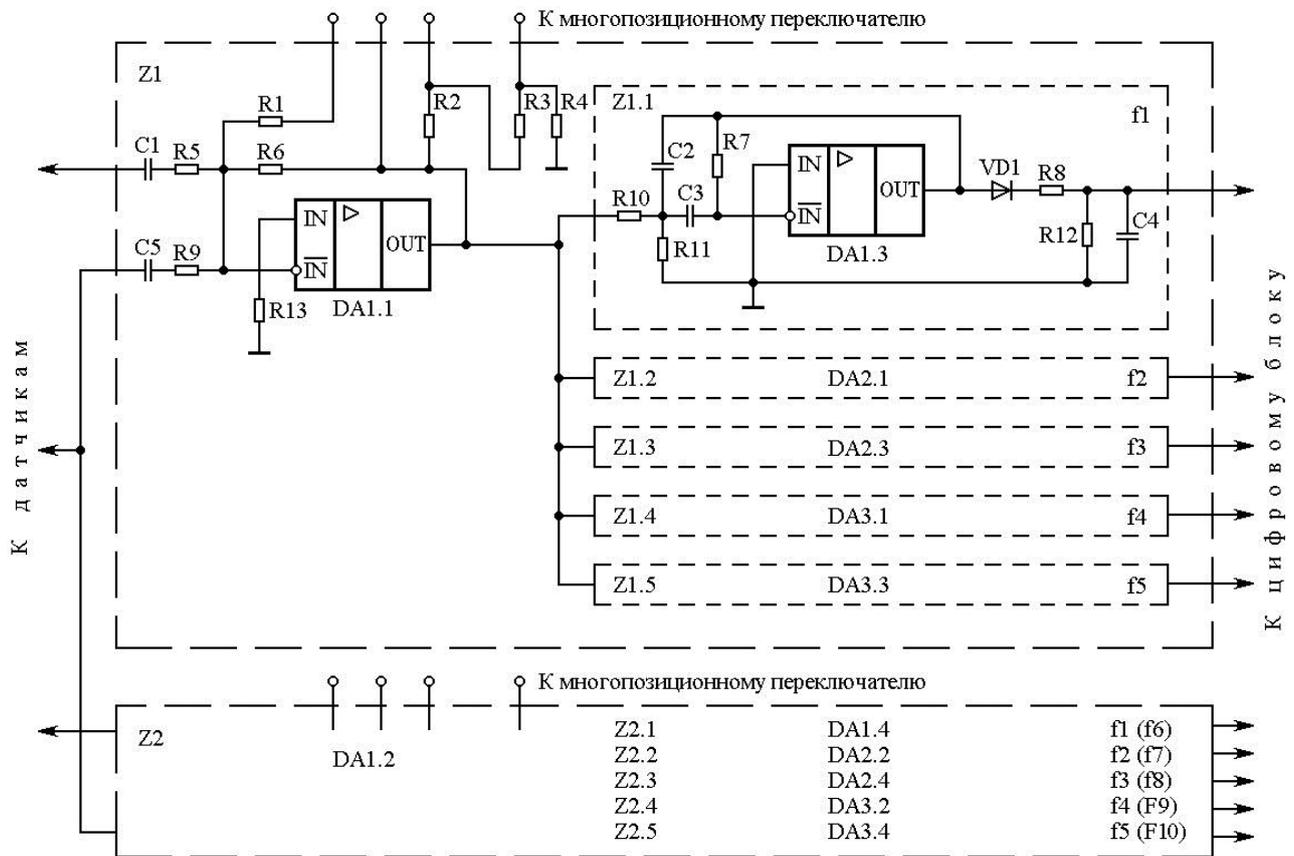


Рисунок 6.4 – Принципиальная схема блока разделительных фильтров на высокоэкономичных микросхемах счетверенных операционных усилителей (для приборов-индикаторов состояния кровли ИСК-1 и ИСК-1Ш)

## 6.2 Разработка цифровых устройств автоматизированного контроля на основе микропроцессоров и микроконтроллеров

### 6.2.1 Определение минимально необходимых вычислительных мощностей аппаратных средств в приложении к конкретным задачам измерений

При создании автоматизированных информационно-измерительных систем и приборов оперативного контроля на основе микропроцессоров, микроконтроллеров и персональных ЭВМ необходимо обеспечить достаточный диапазон обрабатываемых

чисел, разрядность которых определяется точностью технологических датчиков и устройств ввода первичной информации. Реализация вычислительных операций возможна с применением арифметики с фиксированной и с плавающей запятой.

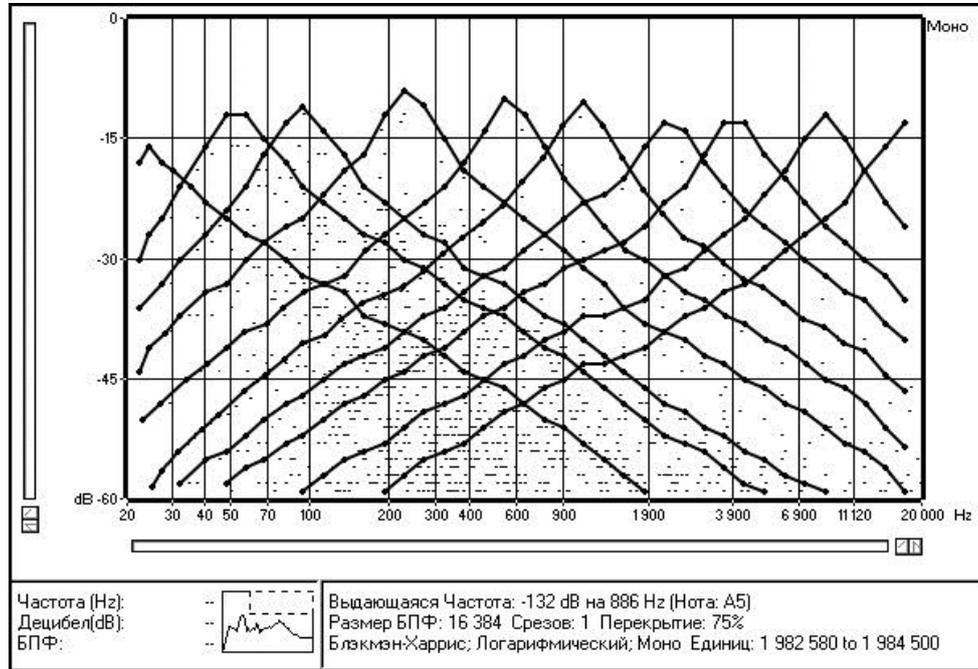


Рисунок 6.5 – Амплитудно-частотные характеристики фильтров на счетверенных микромощных операционных усилителях (сняты и построены автоматически с помощью разработанного измерительного комплекса на базе персональной ЭВМ)

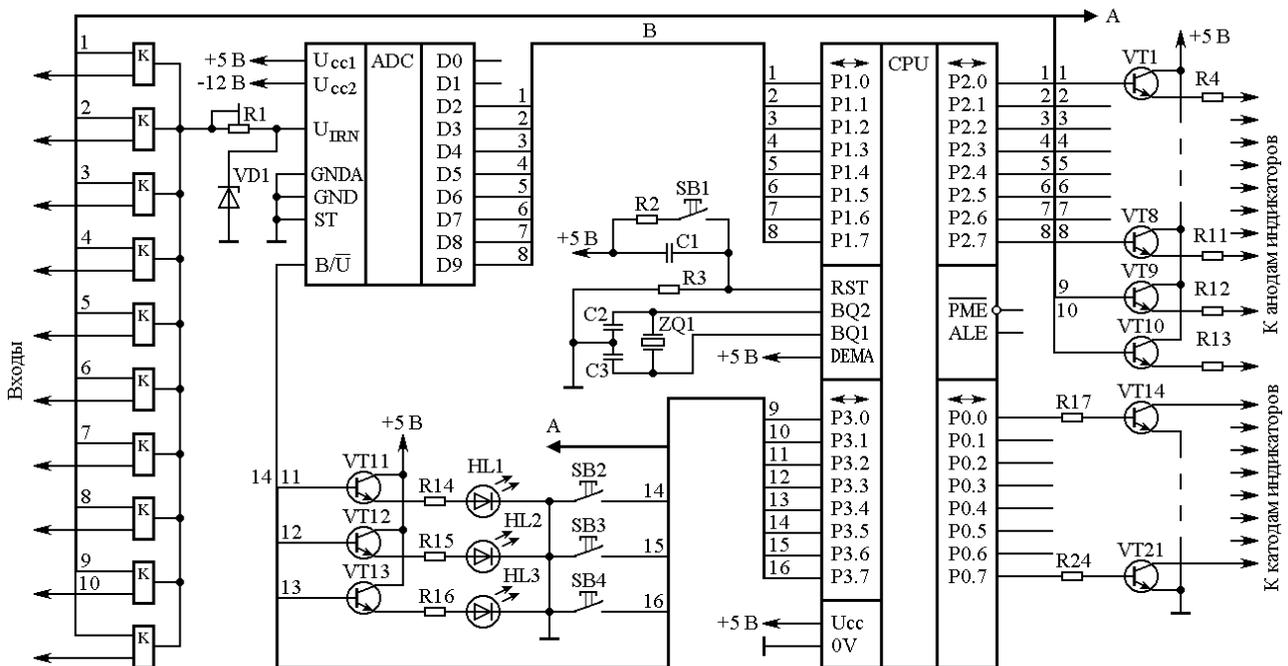


Рисунок 6.6 – Функциональная схема аналого-цифрового блока индикации на базе микромощного АЦП и микроконтроллера с флэш-памятью

---

Программа быстрого преобразования Фурье методом двенадцати ординат, реализующая алгоритмы, приведенные в разделе 5.2, использует арифметику с фиксированной запятой. Хотя арифметика с фиксированной запятой является арифметикой ограниченной точности, все вычисления в программе производятся без округления чисел и без отбрасывания значащих разрядов, то есть без потери точности. Однако в ряде случаев (например, при вычислении отношений сумм амплитуд сигнала в различных каналах) применение арифметики с фиксированной запятой приводит к резкому повышению разрядности чисел и, как следствие, к росту затрат памяти и времени выполнения программ. Так как объем внутренней памяти, расположенной на кристалле микроконтроллера ограничен, в ряде случаев может потребоваться применение внешних микросхем ОЗУ, что в целом снижает надежность и экономичность микропроцессорной системы и увеличивает ее энергопотребление, что особенно нежелательно для приборов оперативного контроля. Повышение времени выполнения программ ведет к снижению верхней границы частотного диапазона измерительного тракта при работе микропроцессорной системы в режиме реального времени.

С увеличением разрядности чисел с фиксированной запятой усложняются алгоритмы их обработки. При этом возрастает неопределенность прогнозирования корректности и точности результатов. Кроме того, разрядность результата не одинакова для различных арифметических действий (например, для умножения и суммирования), т. е. зависит от типа действия и не всегда совпадает с разрядностью операндов.

В связи со сказанным для решения ряда вычислительных задач целесообразно применять арифметику с плавающей запятой, так как она обеспечивает раздельное представление точности и диапазона обрабатываемых чисел (мантиссы и порядка). При этом число байт, отводимых под результат, не зависит от типа арифметического действия и всегда совпадает с числом байт операндов (т.к. определяется не разрядностью операндов, а форматом их представления). Таким образом, подпрограммы арифметики с плавающей запятой должны обеспечивать автоматическое масштабирование операндов и результата в процессе вычислений.

Числа с плавающей запятой имеют следующую общую форму представления [35, 47]:

$$A_R = R^m A_{R\phi}, m = \text{var}, \quad (6.1)$$

где  $R^m$  - характеристика  $R$ -ичного числа  $A_R$ ;  $m$  - целочисленный порядок,  $m \in \{0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm m_{\max}\}$ ;  $A_{R\phi}$  - мантисса числа  $A_R$ , определяемая выражениями:

$$\left. \begin{aligned} A_{R\phi} &= \pm \sum_{i=1}^n a_i R^{-i} = \pm 0, a_1 a_2 \dots a_n; \\ R^{-n} &\leq |A_{R\text{TM}}| \leq 1 - R^{-n} \text{ или } A_{R\phi} = 0, \end{aligned} \right\} \quad (6.2)$$

где  $n$  – разрядность мантиссы;  $a_i \in \{0, 1, \dots, R-1\}$  -  $R$ -ичные цифры. В случае, если мантисса числа удовлетворяет условию

$$R^{-1} \leq |A_{R\phi}| < 1, \quad (6.3)$$

мантисса и число с плавающей запятой являются нормализованными. Нормализованное число определяется единственно возможным образом и обеспечивает наибольшую точность его представления в выбранном  $n$ -разрядном формате.

Для представления нуля в форме с плавающей запятой возможны следующие варианты: 1)  $A_{R\phi} = 0$ ,  $m = m_{\min}$ ; 2)  $A_{R\phi} = 0$ ,  $m = 0$ ; 3)  $A_{R\phi} = 0$ ,  $m$  - произвольно; 4)  $A_{R\phi}$  - произвольно,  $m = m_{\min}$ , где  $m_{\min} = -m_{\max}$ .

Машинное представление числа в формате с плавающей запятой содержит  $n$  разрядов мантиссы и разряд ее знака  $S_M$ , а также  $k$  разрядов порядка и разряд его знака  $S_N$ . При этом порядок  $m$  числа  $A_R$  определяется выражением:

$$m = \pm \sum_{i=0}^{k-1} b_i R^i; 0 \leq |m| \leq R^k - 1, \quad (6.4)$$

где  $b_i \in \{0, 1, \dots, R-1\}$  -  $R$ -ичные цифры порядка.

Для нормализованных чисел с учетом (6.1), (6.2) справедливы следующие выражения:

$$|A_R|_{\min} = R^{-m_{\max}} \cdot R^{-1}; |A_R|_{\max} = R^{m_{\max}} \cdot (1 - R^{-n}). \quad (6.5)$$

Так как согласно (6.4)  $m_{\max} = R^k - 1$ , то выражения (6.5) можно переписать в виде

$$|A_R|_{\min} = R^{-R^k}; |A_R|_{\max} = R^{R^k - 1} \cdot (1 - R^{-n}). \quad (6.6)$$

Таким образом, диапазон нормализованных чисел с плавающей запятой определяется в основном основанием системы счисления и разрядностью порядка числа и практически не зависит от разрядности его мантиссы.

На рис. 6.7 представлены трехбайтный формат двоичного числа с плавающей запятой обычной точности (8, 16) и четырехбайтный формат двоичного числа с плавающей запятой повышенной точности (8, 24).

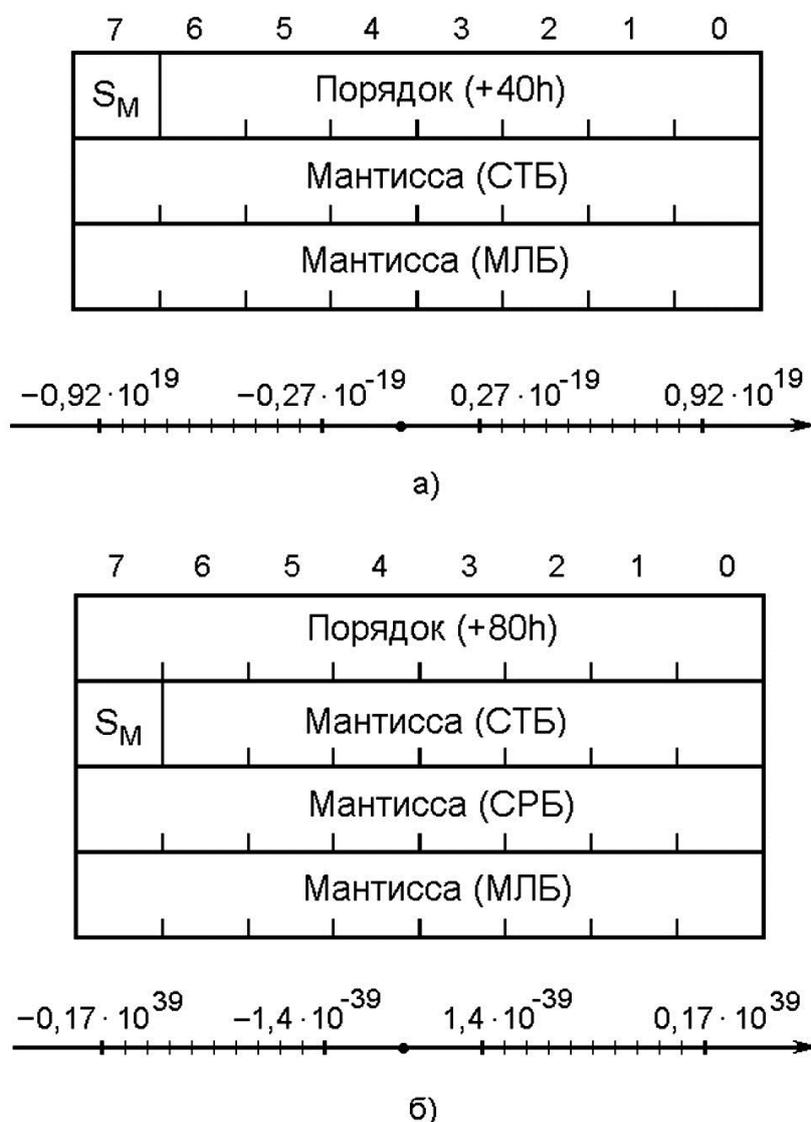


Рисунок 6.7 – Форматы двоичных чисел с плавающей запятой и отображение чисел на оси: а) формат обычной точности; б) формат повышенной точности

В табл. 6.2 приведены пограничные числа форматов (8, 16) и (8, 24) чисел с плавающей запятой [35]. Из таблицы видно, что диапазон и точность представления чисел в формате (8, 16) с плавающей запятой многократно превышают диапазон и точность чисел, получаемых при оцифровке сигналов аналого-цифровыми преобразователями и при дальнейшей вычислительной обработке. Поэтому предложено использовать в контроллерах нижнего уровня автоматизированной системы и в приборах оперативного контроля состояния массива горных пород, конструкций и сооружений формат (8, 16) представления чисел с плавающей запятой и соответствующие арифметические подпрограммы там, где применение формата с фиксированной запятой приводит к резкому увеличению разрядности чисел, например, при интегрировании и вычислении энергетических показателей импульсов.

Таблица 6.2 – Пограничные числа форматов (8, 16) и (8, 24) представления двоичных чисел с плавающей запятой

A	A <sub>16</sub>			A <sub>10</sub>	
	m <sub>см</sub>	A <sub>16φ</sub>	m	2 <sup>m<sub>10</sub></sup> · A <sub>10φ</sub>	A <sub>10</sub>
Пограничные числа формата (8, 16)					
+ A <sub>max</sub>	7F	FFFF	+3F	+ 2 <sup>63</sup> · (1 - 2 <sup>-16</sup> )	+ 0,92 · 10 <sup>19</sup>
- A <sub>max</sub>	FF	0001	+3F	- 2 <sup>63</sup> · (1 - 2 <sup>-16</sup> )	- 0,92 · 10 <sup>19</sup>
+ A <sub>min</sub>	00	8000	-40	+ 2 <sup>-64</sup> · 2 <sup>-1</sup>	+ 0,27 · 10 <sup>-19</sup>
- A <sub>min</sub>	80	8000	-40	- 2 <sup>-64</sup> · 2 <sup>-1</sup>	- 0,27 · 10 <sup>-19</sup>
Пограничные числа формата (8, 24)					
+ A <sub>max</sub>	FF	7FFFFFFF	+7F	+ 2 <sup>127</sup> · (1 - 2 <sup>-23</sup> )	+ 0,17 · 10 <sup>39</sup>
- A <sub>max</sub>	FF	800001	+7F	- 2 <sup>127</sup> · (1 - 2 <sup>-23</sup> )	- 0,17 · 10 <sup>39</sup>
+ A <sub>min</sub>	00	400000	-80	+ 2 <sup>-128</sup> · 2 <sup>-1</sup>	+ 1,4 · 10 <sup>-39</sup>
- A <sub>min</sub>	00	C00000	-80	- 2 <sup>-128</sup> · 2 <sup>-1</sup>	- 1,4 · 10 <sup>-39</sup>

Для измерения и вычисления отношения сумм амплитуд предлагается применять микропроцессорный прибор с перестраиваемой структурой, выходы фильтров которого соединены программно реализованным арифметико-логическим устройством, выполняющим функции делителя и подготавливающим информацию для вывода ее на визуальный индикатор. При использовании централизованной компьютерной автоматизированной системы сбора и обработки информации данные функции могут выполнять удаленные контроллеры. Цифровые фильтры представляют собой программную реализацию рекурсивных биквадратных фильтров второго порядка. Изменяя значения коэффициентов при узлах суммирования, можно реализовать любую искомую передаточную функцию фильтра второго порядка. Требуемая резонансная частота  $f_g$  перестраиваемого цифрового фильтра задается величиной частоты выборки  $f_e$  значений аналогового сигнала. Таким образом, применение микропроцессорных средств обеспечивает универсальность устройства, современный сервис для оператора и высокий уровень автоматизации.

Для повышения оперативности экспресс-контроля и в составе автоматизированной системы обработку информации необходимо производить в реальном масштабе времени. При этом работа цифрового устройства обработки сигналов должна удовлетворять требованиям, записанным в виде системы неравенств [121]

$$\{T_{обм}/T_p \geq 1; \quad T_{обм}V_k \leq 1, \quad (6.7)$$

где  $T_{обм}$  - время обмена сообщениями между блоками прибора;  $T_p$  - время решения задачи;  $V_k$  - скорость передачи информации в канале обмена.

Для задач цифровой фильтрации при контроле “ложной” кровли величина  $T_{обм}$  определяется максимальной частотой цифрового фильтра

$$f_u^{\max} = 10^{\frac{D \lg(2)}{B} + \lg(f_g)}, \quad (6.8)$$

где  $D$  - динамический диапазон фильтра, дБ;  $B$  - крутизна спада “горба” амплитудно-частотной характеристики, выраженная положительным числом, дБ/окт. В соответствии с теоремой о

дискретизации, частота выборки значений аналогового сигнала  $f_e$  должна как минимум вдвое превышать частоту  $f_u^{\max}$ . Для компенсации искажений спектра обычно принимают  $f_e = 10f_u^{\max}$ . Для увеличения ширины полосы пропускания сигнала в частотной области можно снизить значение нормированной частоты выборки  $\Omega = f_e/f_g$ , приняв  $f_e = (4...8)f_u^{\max}$  и повысив коэффициент усиления входного аналогового фильтра низких частот на частоте  $f_g$ . Однако при этом должно соблюдаться условие

$$f_u^{\max} < f_a^{\max} \leq f_e - f_u^{\max}, \quad (6.9)$$

где  $f_a^{\max}$  - частота наивысшей гармонической составляющей сигнала на входе цифровой части прибора (выходе фильтра низких частот).

При максимальной частоте цифрового фильтра  $f_u^{\max} = 480$  Гц, параметрах  $D=50$  дБ,  $B=24$  дБ/окт, в соответствии с (6.8) имеем  $f_a^{\max} = 2034$  Гц. Принимая частоту выборки  $f_e = 8f_u^{\max} = 3840$  Гц, имеем  $f_e - f_u^{\max} = 3360$  Гц, т. е. условие (6.9) соблюдается. Выбранные параметры корректны и для цифрового фильтра с полосой фильтрации 120-240 Гц. Для реализации требуемой резонансной частоты первого фильтра производится обработка каждого второго отсчета. Для выбранных параметров коэффициенты ослабления сигналов, пропущенных цифровыми фильтрами, на верхних границах полос пропускания определяются формулой весовой функции

$$k_\delta = \sin(\pi f_u^{\max} / f_e) / (\pi f_u^{\max} / f_e) \quad (6.10)$$

и составляют 0,97 для обоих фильтров, что практически не сказывается на интегральной оценке энергетической насыщенности спектра сигнала в полосе пропускания. При частоте дискретизации  $f_e = 3840$  Гц время отработки одного вычислительного цикла составляет  $T_e \leq 1/f_e = 260$  мкс. Т.к. одновременно производятся вычисления для двух фильтров, а также вспомогательные операции,

то время вычислений  $\approx 100$  мкс. Пропускная способность прибора оценивается по числу разрядов обрабатываемого сигнала и времени вычислительного цикла  $Q = b/T_g$  и составляет 3850 и 5770 байт/с при 8- и 12-разрядном АЦП соответственно. Требуемой производительностью обладают однокристалльные микроконтроллеры универсального назначения семейств MCS-51/251 и MCS-96/196 фирмы Intel, а также сигнальные процессоры APS-типа. Время преобразования АЦП  $t_c$  не должно превышать  $T_g$ . Отношение сигнал/шум АЦП ( $N/S$ ), определяющее верхний предел динамического диапазона прибора, вычисляется по формуле

$$N/S = 6,02b + 1,76 - 10 \log_2(1 + 12\sigma_{\delta.n.}^2), \quad (6.11)$$

где  $10 \log_2(1 + 12\sigma_{\delta.n.}^2) = \Delta(S/N)$  - девиационное изменение отношения  $N/S$ , выраженное через дисперсию дифференциальной нелинейности преобразователя  $\sigma_{\delta.n.}^2$  [114]. Так как  $\sigma_{\delta.n.}^2$  редко приводится в справочной литературе, то можно либо пренебречь величиной ошибки  $\Delta(S/N)$ , либо определить  $\sigma_{\delta.n.}^2$ , произведя статистическую обработку графика зависимости дифференциальной нелинейности  $\delta_{LD}$  от температуры в диапазоне изменения рабочих температур для данного климатического исполнения прибора. Для 8- и 12-разрядных АЦП отношение сигнал/шум составляет 49,9 и 74,0 дБ соответственно (без учета величины  $\Delta(S/N)$ ).

### **6.2.2 Оценка амплитудных, частотных и временных характеристик акустических импульсов в микропроцессорных приборах оперативного контроля и контроллерах нижнего уровня автоматизированных систем**

Разработана программа SP12i51 быстрого преобразования Фурье (БПФ) методом двенадцати ординат для однокристалльных микроконтроллеров семейств MCS-51, MCS-251 фирмы Intel и совместимых с ними на уровне системы команд. Предложено использовать данную программу для первичной цифровой обработки сигналов в составе программного обеспечения подсистемы нижнего уровня автоматизированной системы обеспечения безопасности

горных работ и надежности функционирования механизированных комплексов, а также в приборах оперативного виброакустического контроля. При исследовании периодических сигналов программа выдает непосредственно конечный результат дискретного преобразования Фурье без необходимости каких-либо последующих вычислений. В связи с этим возможно и рационально ее применение для контроля различных электротехнических систем и процессов. Преобразование непериодических сигналов возможно как с использованием традиционных методов, так и с помощью предложенного метода разбиения аperiodического сигнала на интервалы, в пределах которых изменение сигнала можно принять за один период мнимых периодических колебаний. Программа реализует алгоритмы, предложенные в разделе 5.2, и может обрабатывать как 8- так и 12-разрядные исходные данные. Длительность выполнения программы при использовании 12-разрядных исходных данных возрастает на 28 машинных циклов (28 мкс для микроконтроллера i8051 с тактовой частотой 12 МГц). Выбор алгоритма расчета коэффициентов  $a_0$  и  $a_6$  вычислительной схемы (5.8) в зависимости от разрядности исходных данных производится автоматически при ассемблировании.

При написании программы использовались макросредства и возможности условного ассемблирования. Адреса всех переменных заданы символическими именами. Это позволило сократить число операторов в исходном тексте программы, упростить ее структуру, сделать ее гибкой и перенастраиваемой. Так, при ассемблировании можно задавать разрядность исходных данных, изменять режимы работы программы в объектном коде: с сохранением/без сохранения промежуточных величин; с использованием/без использования буферных ячеек памяти. Предусмотрена возможность автоматического расположения промежуточных и выходных данных в непрерывном массиве сегмента памяти. В то же время макросредства не использовались в случаях, когда их применение вызвало бы удлинение объектного модуля программы за счет лишних обращений к памяти данных, несмотря на наличие описанных макрорасширений. В частности, при вычислении коэффициента  $m_k \cdot a_4$  (см. вычислительную схему (5.8)) использование описанного макрорасширения для определения величины  $\frac{1}{2}l$  привело бы к

ненужному сохранению дробной части числа в процессе выполнения программы. Досрочное прерывание макрорасширения с помощью команды `MACEXIT` в сочетании с методами условного ассемблирования не рационально, т. к. усложняет структуру исходного текста программы. Поэтому блок вычисления величины  $0,5l$  составлен в мнемонических кодах. Т. к.  $r_0$  - целое число (т.е. дробная часть  $r_0$  равна нулю), а дробная часть величины  $0,5l$  представлена только одним старшим битом (бит  $a_8$  на рис. 5.5, а), то для вычисления младшего байта разности  $r_0 - \frac{1}{2}l$  предложен специальный алгоритм, использующий возможности команд битового процессора микроконтроллера. При делении  $l$  на два сдвигом вправо на один разряд младший бит целой части  $l$  попадает в бит переноса, после чего с помощью команды `MOV ACC.7,C` он переносится в старший бит предварительно обнуленного аккумулятора (содержимое признака  $C$  при этом сохраняется). Тем самым сразу формируется младший байт (дробная часть) разности  $r_0 - \frac{1}{2}l$ , а признак переполнения аккумулятора  $C$  модифицируется, т.е. проходит подготовка к вычитанию средних байт  $r_0$  и  $\frac{1}{2}l$  с учетом  $C$ .

Т.к.  $s_0$  целое число (т. е. дробная часть  $s_0$  равна нулю), то для определения коэффициента  $m_k \cdot a_2$  производится суммирование  $s_0$  и целой части величины  $\frac{1}{2}m$ , а младшему байту результата присваивается значение дробной части  $\frac{1}{2}m$ .

При вычислении коэффициентов  $m_k \cdot a_1$ ,  $m_k \cdot a_5$  и  $m_k \cdot b_1$ ,  $m_k \cdot b_5$  значения промежуточных величин  $\frac{\sqrt{3}}{2}s_1, \frac{1}{2}s_2$  и  $\frac{1}{2}p_1, \frac{\sqrt{3}}{2}p_2$  сохраняются некоторое время, что избавляет от необходимости их повторного вычисления. Для поочередного хранения этих величин используются только два байта памяти.

В программе предусмотрена система предупреждений, информирующих пользователя о возможных ошибках адресации переменных при ассемблировании.

Длительность вычисления промежуточных величин по приведенной схеме - 169 циклов для микроконтроллера i8051, что составляет 169 мкс при тактовой частоте 12 МГц, 126 мкс при 16 МГц или 101 мкс при 20 МГц. Для микроконтроллера i80251 длительность вычислений составляет 274 состояния, что соответствует 45 мкс при тактовой частоте 12 МГц или 34 мкс при 16 МГц (в двоичном режиме). Полная длительность вычислений  $t_e$  для микроконтроллера i8051- 491 цикл, что составляет 491 мкс при тактовой частоте 12 МГц, 366 мкс при 16 МГц или 295 мкс при 20 МГц. Для микроконтроллера i80251 длительность вычислений всех коэффициентов составляет 764 состояния, что соответствует 127 мкс при тактовой частоте 12 МГц или 95 мкс при 16 МГц (в двоичном режиме). Таким образом, максимальная частота дискретизации  $f_{ADC} = 12/t_e$  составляет 40,6 кГц для МК i80251 с тактовой частотой 20 МГц или 126,3 кГц для МК i80251 с тактовой частотой 16 МГц. Отладка программы осуществлена в интегральной инструментальной среде COMPASS/51/251 IDE.

Для измерения амплитудных параметров акустических сигналов в соответствии с (4.7, 4.8) предложено применять прибор, структурная схема которого приведена на рис. 6.8, а. Функции аналого-цифрового преобразования и вычислительной обработки сигнала выполняет однокристалльный микроконтроллер со встроенным аналого-цифровым преобразователем. Возможно также применение внешней микросхемы функционально завершеного микромощного АЦП, что не приводит к значительному усложнению схемы. Центральной частью прибора является блок перестраиваемого цифрового фильтра. Он представляет собой программную реализацию рекурсивного фильтра второго порядка с передаточной функцией

$$\tilde{A}(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{D_0 + D_1 z + D_2 z^2}{C_0 + C_1 z + z^2}, \quad (6.12)$$

где  $Y(z)$  - выходная числовая последовательность,  $X(z)$  - входная числовая последовательность,  $z = e^{pT_a}$  - оператор Z-преобразования,  $D_0, D_1, D_2, C_0, C_1$  - коэффициенты при узлах сложения.

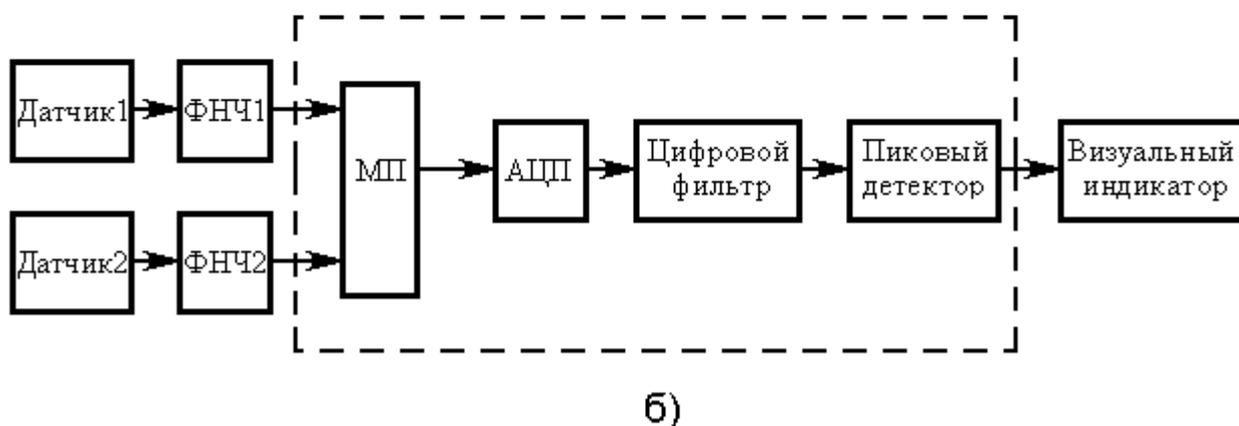
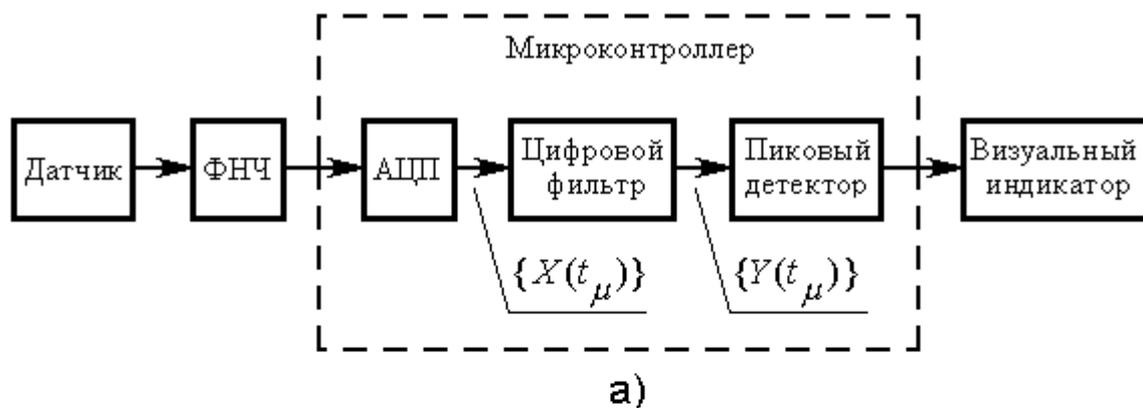


Рисунок 6.8 – Структурные схемы одноканального (а) и двухканального (б) приборов для измерения амплитуд и энергий сигнала в заданных полосах частот: ФНЧ – фильтр низких частот; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; МП – мультиплексор каналов

Изменяя значения коэффициентов  $D_0 - D_2, C_0, C_1$ , можно реализовать любую искомую передаточную функцию фильтра второго порядка и тем самым обеспечить возможность измерения спектральных характеристик обрабатываемого сигнала.

В случае перестраиваемого цифрового фильтра требуемая резонансная частота  $f_r$  или частота среза  $f_g$  задается величиной частоты выборки  $f_a$  значений аналогового сигнала. При этом, согласно теореме о дискретизации, спектр  $|\tilde{F}(jf)|$  входного сигнала должен быть ограничен и для частот свыше  $f_{\max}$  мало отличаться от нуля. В качестве входного перестраиваемого аналогового фильтра

низких частот предлагаются схемы экономичных эквалайзеров на базе специализированных микросхем операционных усилителей КА2223 или ВА3822 (см. рис. 6.1, 6.2). Это обеспечивает легкость согласования частотных характеристик входного ФНЧ с параметрами цифрового фильтра. Выбор данного решения обосновывается простотой схемной реализации, малыми габаритами и потребляемой мощностью устройства. Эквалайзер представляет собой набор регулируемых полосовых фильтров, изменение коэффициентов передачи которых позволяет формировать сложную форму амплитудно-частотной характеристики входного тракта прибора. Это дает возможность не только компенсировать искажения, вызванные неравномерностью АЧХ измерительных датчиков, но и в ряде случаев исключать ошибку, связанную с практической невозможностью получения импульсов Дирака, последовательность которых описывает входной аналоговый сигнал. Действительно, при переходе от импульсной функции к ступенчатой получаем сигнал, спектр которого определяется выражением

$$\tilde{F}'(jf) = \frac{\sin(\pi f/f_a)}{\pi f/f_a} \tilde{F}(jf) , \quad (6.13)$$

где  $\tilde{F}(jf)$  - спектр исходной последовательности импульсов Дирака. Таким образом, имеет место искажение спектрального состава входного сигнала, выраженное так называемой весовой функцией. В этой связи, частоту дискретизации  $f_a$  необходимо выбирать большей, чем  $2f_{\max}$ . Так, при  $f_a=10f_{\max}$  на частоте  $f_{\max}$  коэффициент ослабления составляет 0,98, что пренебрежимо мало. Однако для однокристалльных микроконтроллеров общего назначения такое повышение нормированной частоты выборки  $\Omega_a = f_a/f_g$  нецелесообразно из-за уменьшения значения  $f_{\max}$ , т.е. сужения полосы обрабатываемого сигнала. Поэтому предлагается принять  $f_a=4f_{\max}$ , а возникающие искажения спектра компенсировать увеличением коэффициента усиления эквалайзера вблизи частоты среза цифрового фильтра.

Если необходимо определять соотношение амплитуд сигнала в двух частотных полосах, применяется перестраиваемый двухканальный входной фильтр низких частот на основе эквалайзера

(рис. 6.8, б). Выборка сигнала из того или иного канала осуществляется мультиплексированием.

Ввод аналоговых сигналов в микропроцессорных приборах измерения и контроля геофизических параметров осуществляется с помощью аналого-цифровых преобразователей (АЦП). При этом важно знать передаточные характеристики АЦП, их структурные схемы и особенности применения преобразователей в различных режимах.

Аналого-цифровой преобразователь, включенный по схеме преобразования двуполярного напряжения, имеет смещенную характеристику зависимости выходного кода от входного напряжения, представленную на рис. 6.9, а.

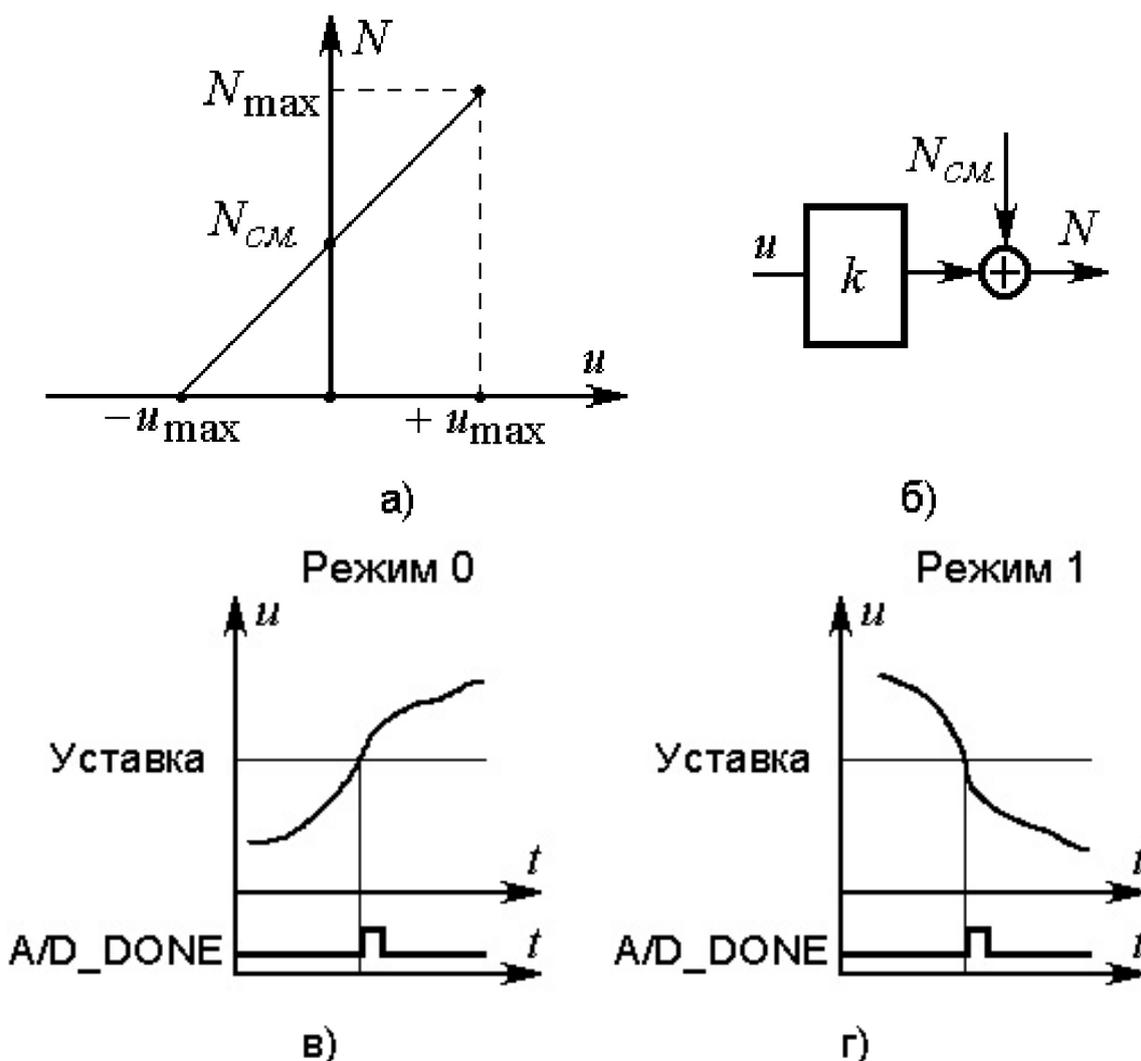


Рисунок 6.9 – График передаточной характеристики (а), структурная схема (б) внешнего аналого-цифрового преобразователя и его работа в режимах 0 (в) и 1 (г) порогового детектирования сигнала

Аналитически эта зависимость выражается формулой

$$N = u \cdot k + N_{см} , \quad (6.14)$$

где  $N$  - выходной код,  $u$  - входное напряжение,  $k$  - передаточный коэффициент АЦП,  $N_{см} = 2^{n-1} - 1$  - величина смещения передаточной характеристики,  $n$  - разрядность АЦП.

Передаточный коэффициент  $k$  АЦП определяется как отношение максимального возможного выходного кода преобразователя  $N_{max}$  к диапазону изменения входного напряжения  $\Delta u$ . Передаточной функции аналого-цифрового преобразователя (6.14) соответствует структурная схема, представленная на рис. 6.9, б.

Использование микроконтроллеров со встроенным аналого-цифровым преобразователем позволяет во многих случаях упростить схему, снизить потребляемую прибором мощность и габаритные размеры. Встроенный в однокристалльный микроконтроллер восьмиканальный АЦП может работать в двух режимах: стандартного аналого-цифрового преобразования и порогового детектирования. Это позволяет определять требуемые параметры акустических сигналов. Встроенный АЦП может выполнять 8- и 10-битовые преобразования. Первый режим целесообразно использовать для систем реального времени, критичных по быстродействию. Режим 10-битового преобразования используется в случае оцифровки сигнала с сохранением массива мгновенных значений в оперативном запоминающем устройстве с последующей вычислительной обработкой. Таким образом, выбор между режимами 8- и 10-битового преобразования заключается в поиске компромисса между требованиями к динамическому и частотному диапазонам измерительного тракта.

Так как выборки сигнала необходимо выполнять через строго определенные, равные интервалы времени, то запуск АЦП надо производить в режиме автоматического сканирования A/D\_SCAN\_MODE [54]. Результат преобразования для микроконтроллеров серии MCS-96 фирмы Intel помещается в регистр AD\_RESULT и определяется выражением

$$N = (2^n - 1) \frac{u - U_{AGND}}{V_{REF} - U_{AGND}} , \quad (6.15)$$

---

где  $n = \begin{cases} 8 - \text{для } 8 - \text{разрядного преобразования;} \\ 10 - \text{для } 10 - \text{разрядного} \end{cases}$ ,  $U_{AGND}$  - напряжение

аналоговой земли,  $V_{REF}$  - напряжение высокостабильного источника питания АЦП.

При  $U_{AGND} = 0$  встроенный АЦП имеет несмещенную передаточную характеристику вида  $N = ki$  и является усилительным звеном. В случае, если необходимо вводить знакопеременный (реверсивный) сигнал, применяется его предварительное преобразование к знакопостоянному прибавлением постоянной составляющей с помощью входного операционного усилителя [54]. В результате график передаточной функции и структурная схема входного усилителя вместе с АЦП принимают вид рис. 6.9.

Для определения временных параметров импульсных сигналов АЦП включается в режим порогового детектирования по одному из входов. В данном режиме при достижении входным напряжением значения пороговой уставки снизу вверх (режим 0, рис. 6.9, в) или сверху вниз (режим 1, рис. 6.9, г) формируется сигнал прерывания от АЦП - A/D\_DONE.

Для измерения длительности импульсных геофизических сигналов предлагается использовать один из аналоговых вводов микроконтроллера, ко входу которого подключен выпрямительный детектор. При этом алгоритм обработки прерывания A/D\_DONE от АЦП должен обеспечивать защиту от повторных ложных срабатываний. Предлагается следующий алгоритм подпрограммы прерывания (рис. 6.10).

В случае необходимости сохранения содержимого регистров общего назначения либо регистров специальных функций, используемых подпрограммой, ее алгоритм должен включать соответствующие блоки работы со стековой памятью (на рис. 6.10 не показаны). Блоки 11 и 12 предназначены для защиты от программного «зависания». Основная программа должна инициализировать АЦП в режим 0 порогового детектирования сигнала.

Приведенный алгоритм с изменениями, соответствующими конкретной архитектуре, может быть применен для любых микроконтроллеров, имеющих аналогичную систему прерываний и встроенный аналого-цифровой преобразователь.

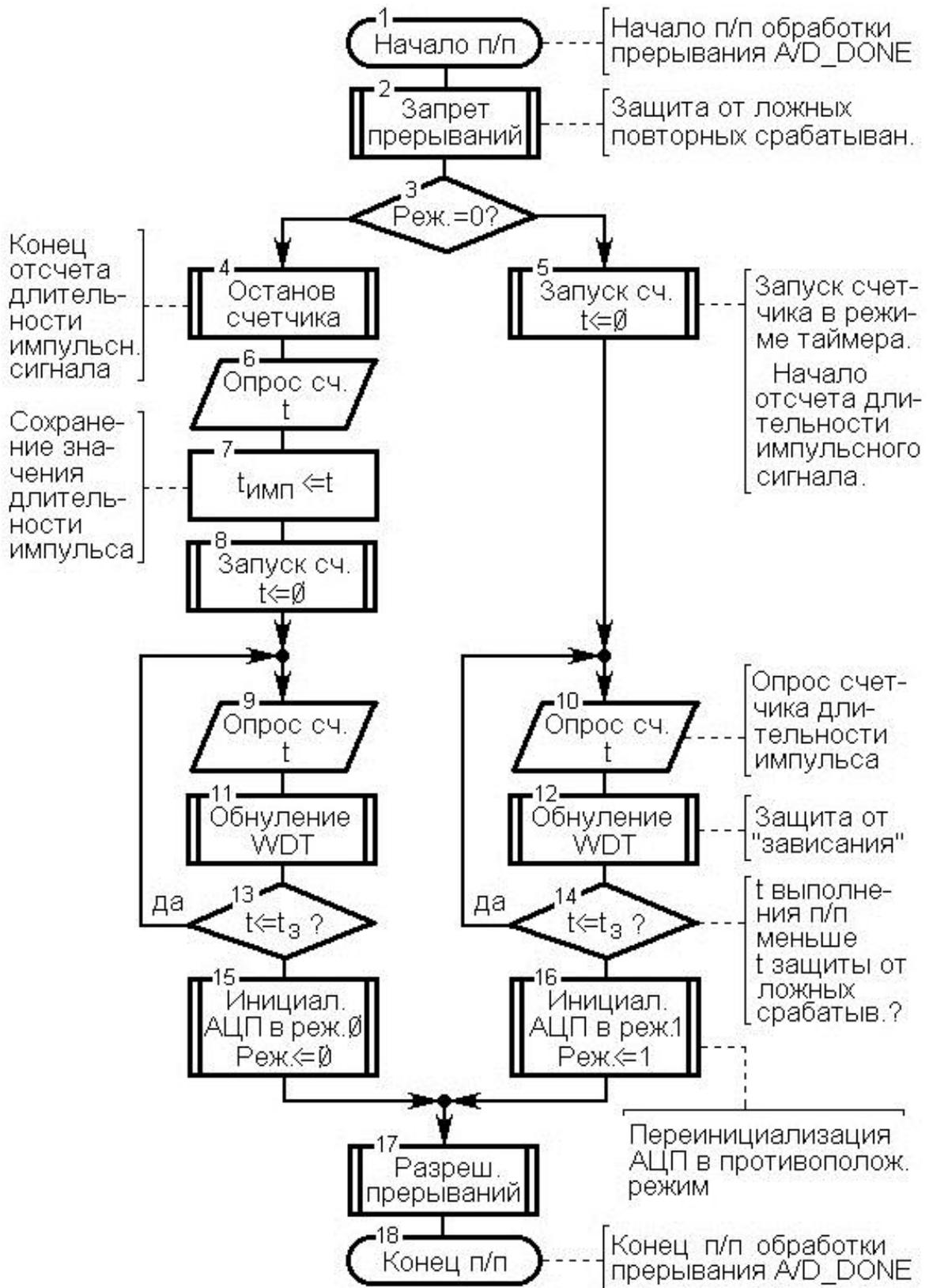


Рисунок 6.10 – Алгоритм подпрограммы обработки прерывания A/D\_DONE от аналого-цифрового преобразователя

---

### 6.3 Автоматизация метрологической поверки средств контроля на основе персональной ЭВМ

При проведении научных исследований мощным и универсальным средством обработки информации является персональная ЭВМ [45]. В этой связи встает вопрос о вводе аналоговых сигналов в память компьютера. Как правило, для этого применяются специализированные платы, имеющие в своем составе многоканальные аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи (с частотой дискретизации 100 кГц и выше), сигнальный процессор DSP-типа, элементы гальванической развязки и линии ввода/вывода дискретных сигналов. Наличие такой гаммы встроенных устройств обуславливает высокую стоимость платы, а стоимость лицензионного программного обеспечения цифровой обработки сигналов может быть на порядок выше. Однако для ввода сигналов звукового диапазона частот и их последующей вычислительной обработки возможности специализированных плат в большинстве случаев являются избыточными. В связи с этим предложено производить ввод аналоговых сигналов с помощью звуковой карты [7]. Современные звуковые карты обладают высокими техническими характеристиками (см. табл. 6.3), а массовость их выпуска обуславливает низкую цену и широкий выбор доступного программного обеспечения [118].

При вводе аналоговых сигналов звукового диапазона частот необходимо обращать внимание на следующие моменты, связанные с особенностями звуковых плат.

В технических данных большинства плат не указываются такие важные для исследователя параметры как неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) входного тракта, коэффициент нелинейных искажений, невзвешенное отношение сигнал/(фон+шум) и др. В связи с этим необходимо предварительно определить требуемые характеристики и откалибровать плату по коэффициенту усиления с помощью генератора низких частот.

Для уменьшения уровня шума и наводок звуковую карту следует вставлять в тот свободный слот материнской платы, который расположен дальше от занятых другими платами разъемов. По возможности надо отдать предпочтение звуковым картам, имеющим средства экранирования элементов, динамический шумоподавитель и позолоченные аудио-разъемы.

Таблица 6.3 – Технические характеристики звуковых плат IBM-совместимых персональных компьютеров

Характеристика	Значение
Частота дискретизации, кГц	4-44,1 5,5-48
Разрядность АЦП, бит	8/12/16
Динамический диапазон АЦП, дБ	48/72/90
Тип преобразователя	Совмещенный АЦП/ЦАП Sigma-delta CODEC
Формат преобразования	PCM (Pulse-Code-Modulation)
Число линейных входов	2 (1-стерео)
Число уровней регулировки входного сигнала и баланса	64
Диапазон регулировки уровня входного сигнала и баланса, дБ	32
Операционная система	DOS, Windows 3.x, Windows 95, Windows 98, Windows NT, OS/2

В случае использования двух линий звукового входа для записи сигналов при необходимости следует учитывать переходные затухания между стереоканалами. Для одновременной записи четырех сигналов можно поставить две звуковые платы, обеспечив программную синхронизацию их работы.

В состав некоторых звуковых карт с 8-разрядным АЦП для увеличения динамического диапазона введен входной автоматический регулятор уровня. Применение таких плат для научных исследований сильно затруднено в связи с невозможностью отслеживания текущего коэффициента усиления входных цепей. В таких случаях, если позволяет драйвер, функцию автоматического регулирования уровня надо отключать. Многие звуковые платы оснащаются входными программно-управляемыми фильтрами и сигнальными DSP-процессорами. Для обеспечения метрологической точности результатов необходимо произвести программную настройку этих устройств либо отключить их.

С помощью звуковой платы можно осуществить также ввод в ЭВМ сигналов постоянного тока, предварительно выполнив их модуляцию с помощью внешнего амплитудного модулятора. Выбор

---

несущей частоты должен удовлетворять условию теоремы Котельникова.

Программное обеспечение, разработанное ведущими мировыми фирмами, позволяет производить 24-битную запись сигналов с частотой дискретизации до 96 кГц, что с избытком реализовывает возможности звуковых карт. Наиболее удобными для обработки сигналов (в том числе и в реальном времени) являются программы SpectraLAB FFT Spectral Analysis System фирмы Sound Technology Incorporated и Sound Forge фирмы Sonic Foundry Inc. Они позволяют: получать спектрограммы сигнала; определять амплитуду и частоту пика, уровень постоянной составляющей на выделенном участке осциллограммы; позиционировать курсор по пику сигнала; производить поиск участков осциллограммы по заданным признакам; выполнять динамическое шумоподавление по стандартным и задаваемым пользователем алгоритмам; устранять импульсные искажения. Спектральные характеристики сигнала могут быть представлены в виде сонограмм, графиков и гистограмм в линейной или логарифмической шкале с различным числом временных срезов. Пространственная 3-D спектрограмма позволяет оценить изменение АЧХ сигнала с течением времени.

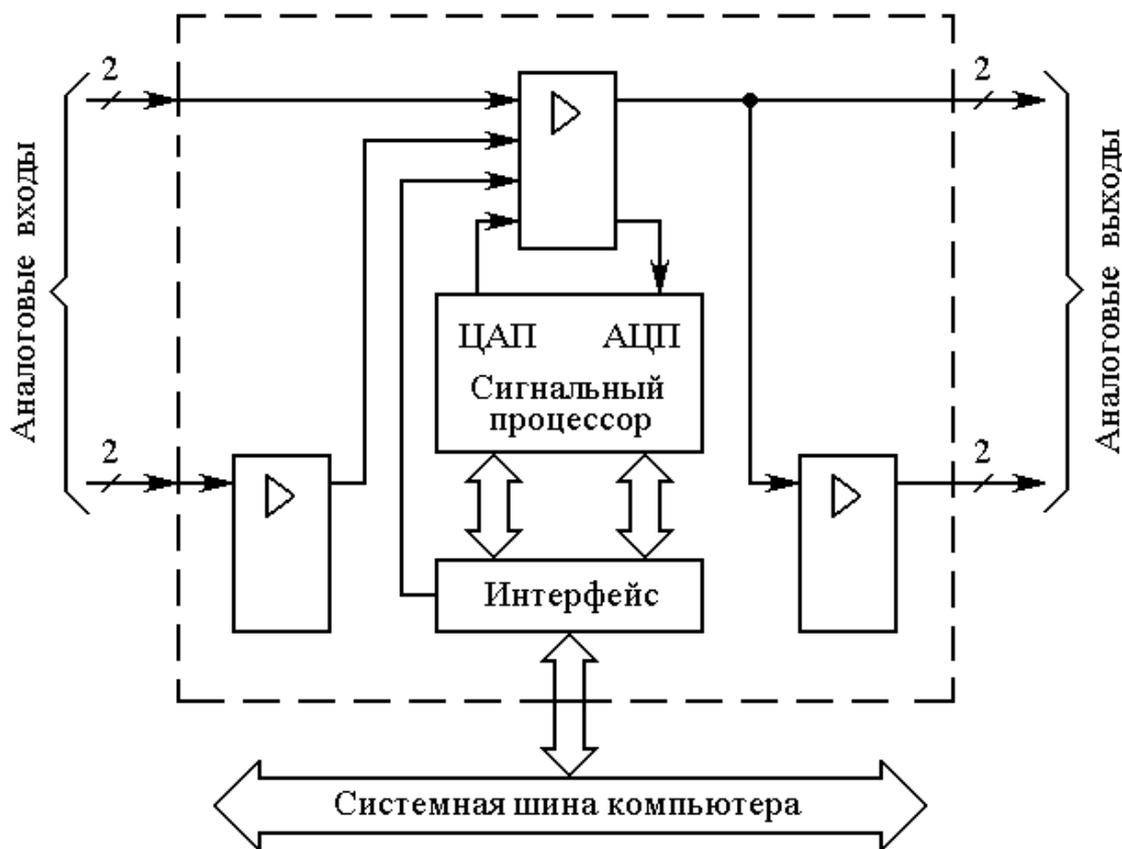
В то же время использование указанных программ в научных исследованиях затруднено тем, что результаты математической обработки представляются в основном в графическом виде без возможности просмотреть или распечатать массивы и таблицы чисел. В связи с этим разработано оригинальное программное обеспечение статистической и спектральной обработки сигналов и функциональных зависимостей. Разработана программа перевода волновых файлов в текстовые файлы мгновенных значений сигнала. Это позволяет обрабатывать записанные с помощью звуковой карты сигналы различными Windows-приложениями (Mathcad, MathLAB, Excel и др.).

Большинство программ записи сигналов звукового диапазона частот с помощью звуковой карты предусматривают возможность сохранения данных в RIFF-формате (Resource Interchange File Format) [118]. Файл такого формата состоит из вложенных фрагментов, один из которых содержит непосредственно считанные из АЦП данные. Внешний фрагмент файла начинается заголовком, включающим четырехсимвольный код «RIFF», идентифицирующий данные, и двойное шестнадцатиричное слово, определяющее размер области

данных в байтах (рис. 6.11, а). Область данных не имеет фиксированной длины. В случае необходимости производится выравнивание области данных на границу слова путем добавления в конец файла незначащих нулей до целого числа двойных слов.



а)



б)

Рисунок 6.11 – Структура файла RIFF-формата (а) и структурная схема (б) звукового интерфейса измерительного комплекса на базе персональной ЭВМ

---

Область данных внешнего фрагмента RIFF-файла, полученного путем ввода данных с помощью звуковой карты, содержит вложенные фрагменты, вмещающие в себя соответствующие заголовки с идентификаторами, фиксирующими тип данных, их формат и размер области мгновенных значений оцифрованного сигнала (рис. 6.11). Файл может содержать также фрагменты, содержащие его название и дату создания, информацию об авторстве и авторских правах, предмете и программе, сформировавшей файл. Алгоритм разработанной программы, осуществляющей перевод волновых файлов в текстовые файлы мгновенных значений сигнала, определяется RIFF-форматом. Сначала производится считывание, идентификация файла и поиск области звуковых данных, затем выполняется перевод данных из двухбайтного формата в дополнительном коде шестнадцатиричной системы счисления в десятичную. После этого формируется и записывается на жесткий диск компьютера выходной текстовый файл.

Обобщенная структурная схема звуковых плат для IBM-совместимых компьютеров приведена на рис. 6.11, б. Для записи аналоговых сигналов с помощью звуковой карты необходимо предварительно открыть устройство ввода, указав ему формат данных и подготовить для ввода несколько блоков памяти. Затем подготовленные блоки по мере необходимости передаются драйверу устройства ввода, который заполняет их оцифрованными текущими значениями уровня аналогового сигнала. После окончания записи необходимо сформировать и записать в файл RIFF-формата заголовок файла и фрагмент, содержащий данные из использованных блоков памяти [7, 118].

Для метрологической поверки измерительного тракта «воспроизведение/запись» звуковых карт компьютеров разработаны и сохранены в виде файлов в формате RIFF (PCM-кодирование) последовательности мгновенных значений тестовых сигналов плавающих и дискретных частот. Основные их параметры приведены в табл. 6.4.

Тестовая последовательность G1f-45 представляет собой файл мгновенных значений сигнала следующего ряда дискретных частот (Гц), определяемого выражением  $10 \cdot 2^{n/4}$ , где  $n$  - порядковый номер интервала: 10,0; 11,890; 14,140; 16,820; 20,0; 23,780; 28,280; 33,640; 40,0; 47,570; 56,570; 67,270; 80,0; 95,140; 113,14; 134,54; 160,0;

190,27; 226,27; 269,09; 320,0; 380,55; 452,55; 538,17; 640,0; 761,09; 905,10; 1076,0; 1280,0; 1522,0; 1810,0; 2153,0; 2560,0; 3044,0; 3620,0; 4305,0; 5120,0; 6089,0; 7241,0; 8611,0; 10240; 12180; 14480; 17220; 20480. Преимущество тестового сигнала данной дискретной последовательности по сравнению с сигналом плавающей частоты состоит в том, что каждой текущей секунде воспроизведения соответствует определенная частота, постоянная в течение одной секунды. Это облегчает визуальное определение координат АЧХ по графику огибающей сигнала, т.к. он принимает вид гистограммы (график огибающей сигнала плавающей частоты для линейных звеньев имеет вид непрерывной кривой). Для проверки линейности частотных сонограмм тестируемых аналоговых устройств более удобны последовательности мгновенных значений сигналов плавающей частоты (G2p-1, G2p-2, G2p-3).

Таблица 6.4 – Основные параметры тестовых сигналов

Имя файла	Назначение	Диапазон частот, Гц	Количество ступеней частот	Вид сонограммы	Метод синтеза
G1f-45	Генератор дискретных частот	10-20480	45	Показательная функция	Операторный 1р FM
G1f-12	Генератор дискретных частот	10-20480	12	Показательная функция	Операторный 1р FM
G2p-1	Генератор плавающей частоты	10-21750	-	Линейная	Операторный 2р FM
G2p-2	Генератор плавающей частоты	10-22050	-	Линейная	Операторный 2р FM
G2p-3	Генератор плавающей частоты	10-22050	-	Линейная, ломаная	Операторный 2р FM

Метрологическая поверка параметров применяемой в измерительном комплексе звуковой карты «Audician 32 plus» производилась автономно с использованием вычислительных и аппаратных средств собственно звуковой карты и компьютера. При этом тестовый сигнал, сформированный ЦАП звуковой карты с

помощью файла последовательности мгновенных значений с известными параметрами, подавался на вход АЦП (рис. 6.12, б). После этого производилось сравнение параметров исходного тестового файла и файла мгновенных значений сигнала, считанного из АЦП. Контрольные замеры производились с использованием внешнего генератора звуковых частот ГЗ-111, осциллографа С1-49 и анализатора спектра С4-74.

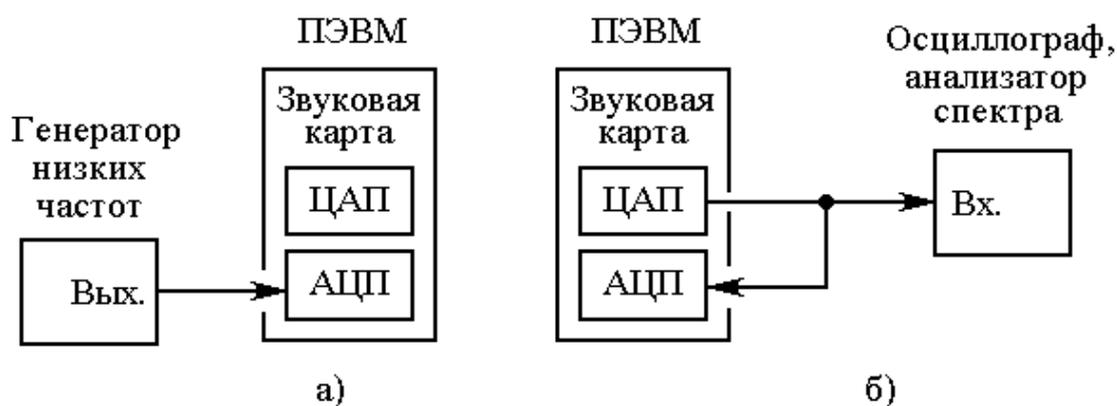


Рисунок 6.12 – Схемы включения для метрологической поверки измерительного комплекса: а) поверка тракта записи с использованием внешнего эталонного генератора низких частот; б) поверка тракта воспроизведения и замкнутого измерительного тракта с использованием внешних измерительных приборов

Как показали исследования, звуковая карта «Audician 32 plus» обладает высокими техническими характеристиками, позволяющими производить как качественную оценку, так и количественные измерения параметров сигналов и частотных характеристик аналоговых приборов и устройств. Неравномерность АЧХ тракта «воспроизведение-запись» карты не превышает 2,5 дБ в диапазоне частот 23,780-17220 Гц. В случае использования весовых коэффициентов или тестовых сигналов со специально подобранной зависимостью амплитуд можно снизить неравномерность АЧХ до уровня 0,3-0,5 дБ. На входе АЦП имеется постоянная составляющая отрицательной полярности уровня -49,1 дБ, что составляет примерно 0,35 % от уровня максимального входного сигнала. Влияние постоянной составляющей при измерениях нивелируется программно путем установки соответствующей опции (рис. 6.13). Уровень собственных шумов платы при отключенном входе – не превышает - 66 дБ (0,05%); при использовании в качестве генератора

встроенного ЦАП уровень шумов замкнутого измерительного тракта – не более -49,1 дБ (0,35%), см. рис. 6.13.

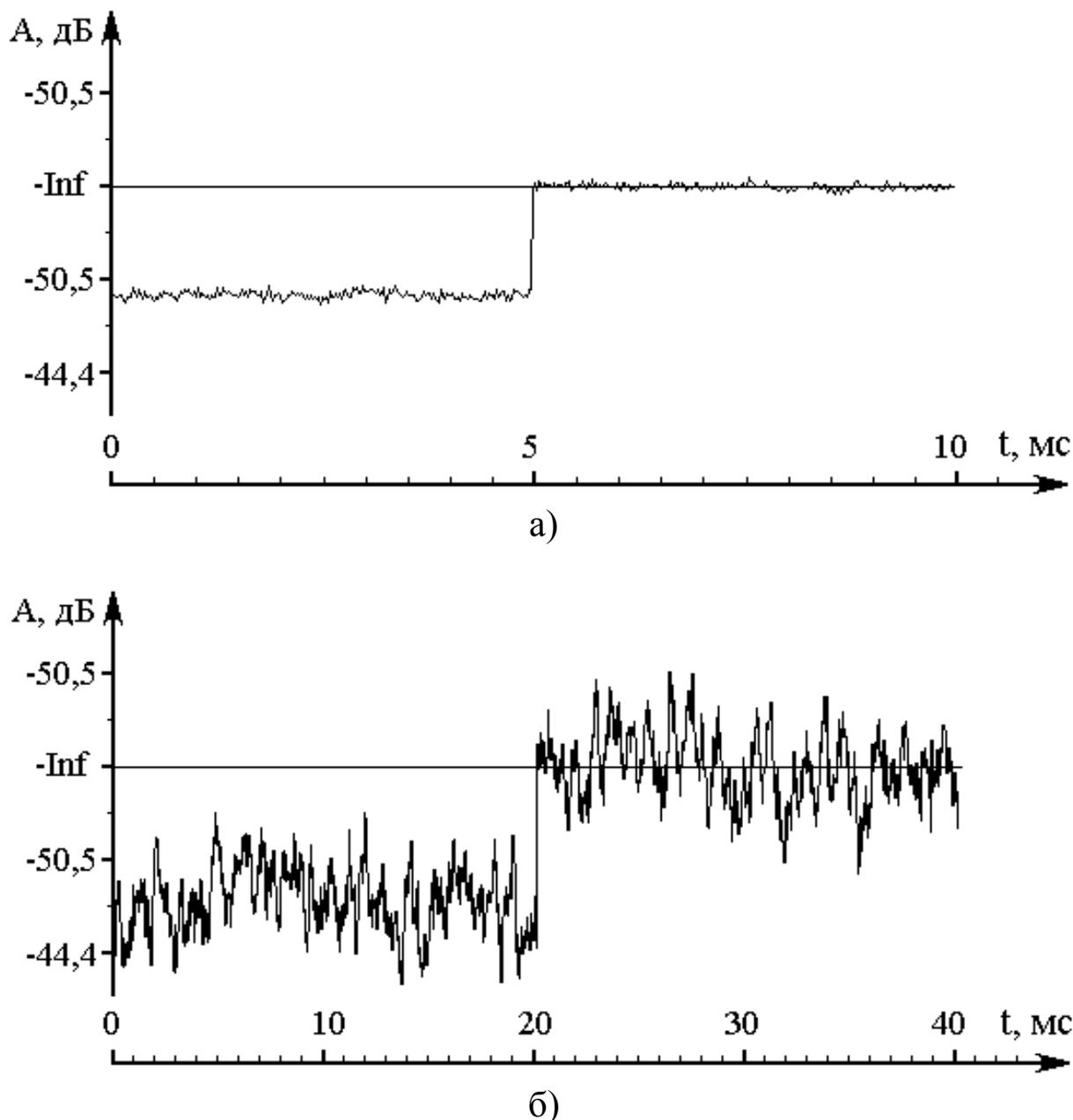


Рисунок 6.13 – Отрицательная составляющая на входе аналого-цифрового преобразователя и ее компенсация: а) при отключенном входе; б) при использовании встроенного генератора звуковых частот

Возможны следующие схемы подключения тестируемых устройств к измерительной аппаратуре: без использования компьютера и звуковой карты (рис. 6.14, а); с использованием компьютера и внешнего осциллографа или анализатора спектра (рис. 6.14, б); с использованием компьютера и внешнего генератора

низких частот (рис. 6.14, в); схема, использующая только возможности компьютера и звуковой карты (рис. 6.14, г).

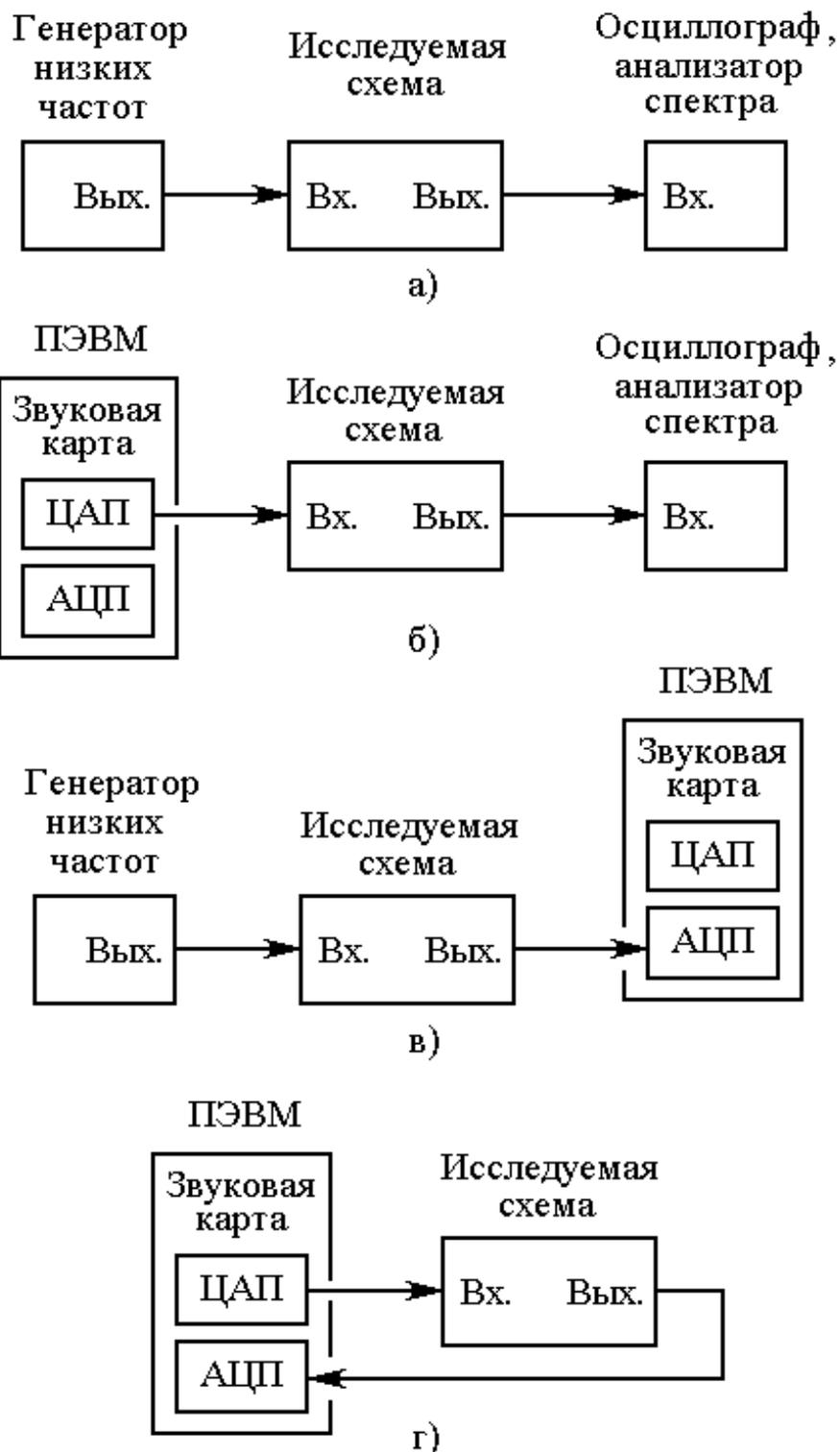


Рисунок 6.14 – Измерение характеристик исследуемых устройств: а) с использованием внешних измерительных приборов; б) с использованием внешнего осциллографа или анализатора спектра; в) с использованием внешнего генератора; г) без использования внешних измерительных приборов

Последняя схема позволяет наиболее полно автоматизировать процесс измерений и является более предпочтительной. Схемы измерений с применением внешних устройств использовались для подтверждения достоверности результатов.

С помощью звуковой карты «Audician 32 plus» успешно выполнены ввод и обработка на ЭВМ сигналов виброакустического контроля бетонных и гипсовых плит, тоннельных обделок, кровли и крепи выработок.

#### **6.4 Выводы по разделу**

Определены параметры аналого-цифровых и микропроцессорных средств автоматизации контроля, обеспечивающие реализацию предложенных методов и алгоритмов. Исходя из требований к точности вычислений в различных приборах, используется 12- или 16-разрядный формат представления двоичных чисел с фиксированной запятой с использованием старшего разряда как знакового или формат представления двоичных чисел с плавающей запятой обычной точности. Исходя из конкретных параметров цифровых фильтров (динамического диапазона, частоты среза и крутизны спада амплитудно-частотной характеристики) и требования обеспечения работы в режиме реального времени, вычислены минимально допустимые времена вычислительных циклов, частоты выборки и необходимые пропускные способности цифрового канала, выбрана современная отечественная и импортная элементная база, отвечающая этим требованиям. Коэффициент ослабления сигнала на верхних границах полос пропускания цифровых фильтров не ниже 0,97.

На основе оптимизированного для вычислений в двоичном коде метода двенадцати ординат разработана программа быстрого преобразования Фурье. При обработке 8-, 10- и 12-разрядных данных динамический диапазон преобразования составляет соответственно 48,1, 60,2 и 72,2 дБ. Ошибка вычисления коэффициентов ряда Фурье составляет 0,134%. Длительность выполнения программы микроконтроллером семейства MCS-51 491 мкс при тактовой частоте 12 МГц, 366 мкс при 16 МГц или 295 мкс при 20 МГц. Для микроконтроллера i80251 длительность выполнения программы соответственно 127 или 95 мкс. Максимальная частота дискретизации

---

сигнала составляет 40,6 кГц для микроконтроллеров MCS-51 или 126,3 кГц для i80251.

На основе современных специализированных малопотребляющих микросхем операционных усилителей, аналого-кодовых и аналого-цифровых преобразователей, логических схем и однокристальных микроконтроллеров разработаны и созданы экспериментальные образцы функциональных узлов контроллеров нижнего уровня автоматизированной системы и приборов оперативного контроля устойчивости породного массива, отличающиеся от ранее известных лучшими массо-габаритными показателями, меньшим токопотреблением и расширенными сервисными возможностями. Проведена апробация экспериментальных образцов разработанных приборов-индикаторов при контроле различных электротехнических установок и горнотехнических процессов, в частности работы насосов насосных станций, устойчивости крепи горных выработок и массива пород, пустотности заобделочного пространства. Индикаторы обеспечивают высокую производительность и информативность контроля.

На базе IBM-совместимой персональной ЭВМ и звуковой карты создан автоматизированный контрольно-измерительный комплекс, позволяющий производить качественную оценку и количественные измерения параметров сигналов и частотных характеристик приборов и устройств. Неравномерность амплитудно-частотной характеристики тракта «воспроизведение-запись» комплекса в диапазоне частот 23,780-17220 Гц не превышает 2,5 дБ, в случае использования специальных тестовых сигналов – 0,5 дБ. Уровень постоянной составляющей на входе аналого-цифрового преобразователя –49,1 дБ (0,35% от максимального уровня сигнала). Уровень собственных шумов при отключенном входе – не более -66 дБ (0,05%). Уровень собственных шумов замкнутого измерительного тракта при использовании генератора на встроенном аналого-цифровом преобразователе – не более -49,1 дБ (0,35%).

---

## **7 АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ КОНТРОЛЯ СИСТЕМЫ "КРЕПЬ-ПОРОДНЫЙ МАССИВ"**

---

### **7.1 Контроль состояния крепи подземных выработок**

Как дополнение к «Пособию по восстановлению крепи и армировки вертикальных стволов. РД.12.18.073-88» разработано «Руководство по геофизической диагностике системы «крепь - породный массив» вертикальных стволов». Пособие содержит общие рекомендации по выбору средств контроля и методические указания по выполнению диагностики закрепленных и незакрепленных участков стволов с использованием методов: виброакустического, электрометрического и регистрации естественного электромагнитного излучения. Сформулированы общие принципы оценки системы «крепь-породный массив» на базе анализа результатов отдельных видов контроля и статистической обработки данных геофизических измерений. Технические средства, критерии и параметры контроля свойств и состояния геотехнических систем приведены в приложении руководства [98]. В данном разделе изложены дополнительные методические особенности автоматизированного контроля.

Для апробации предложенных методов и средств автоматизации виброакустического контроля, выбора рационального типа крепления и определения условий его эксплуатации проведены исследования состояния массива пород, крепи горных выработок и взаимодействия крепи с массивом. Исследования выполнены на шахтах «Днепровская», ПО «Павлоградуголь», «Центральная» (в период подготовки шахты к закрытию), ПО «Стахановуголь», гипсовой шахте Артемовского алебастрового комбината, а также на рудниках № 1 и № 2 ГГХП «Полиминерал», Лоцманском железнодорожном тоннеле и в условиях строящегося и эксплуатируемого участков метрополитена (ст. «Вокзальная», «Коммунарская», «Заводская», «Центральная»), г. Днепропетровск.

Систему «крепь-породный массив» в зависимости от условий взаимодействия можно идентифицировать как колебательную систему, которая состоит из различных элементов. Повышение нагрузки на крепь со стороны массива до начала разрушения крепи

---

увеличивает жесткость системы в целом, что при ударном воздействии, следуя разделу 4.1, приводит к экспоненциальному затуханию нормальных волн. Частоты вынужденных колебаний определяются резонансными явлениями, они зависят от длины акустических полуволн, которые соизмеримы с размерами элементов колебательных конструкций [20].

На 1-м перегонном тоннеле Днепропетровского метрополитена проведены типичные испытания двух смежных старогодных тубингов, смонтированных в 52-м кольце (ПК-60). Указанные тубинги ранее извлечены из старой обделки этого же тоннеля. Для сравнения сделаны измерения и по тубингам новой обделки (в кольцах 53 и 54). Измерения выполнены приборами автоматизированного виброакустического контроля ИСК-1Ш и «Дикон». Результаты испытаний показали, что все тубинги имеют одинаковые акустические параметры (звукопроводимость, затухание колебаний и спектры). Нарушений и трещин не обнаружено (рис. 7.1). Точками на рисунке обозначены места ударов, стрелками – места расположения датчиков, цифрами – номера тубингов и показания приборов. По результатам испытаний составлены акт и заключение, на основании которых тубинги использованы повторно.

Как было показано в разделах 4.2 и 5.3, правильный выбор точек контроля, базы прозвучивания и массы ударника обеспечивает наибольшую информативность и точность контроля. При этом выбор точек контроля определяется пространственной структурой контролируемого объекта, база прозвучивания должна соответствовать геометрическим размерам объекта и желаемой глубинности контроля, рис. 7.2. Кроме того, выбор базы является эффективным инструментом отфильтровывания первой, информативно значимой резонансной моды (см. разделы 4.1 и 5.3), рис. 7.2, ж. Масса ударника должна соответствовать геометрическим размерам контролируемого объекта: с увеличением базы прозвучивания для больших объектов, во-первых, увеличивается затухание реальных акустических волн, а, во-вторых, для возбуждения больших толщ необходим ударник большей массы.

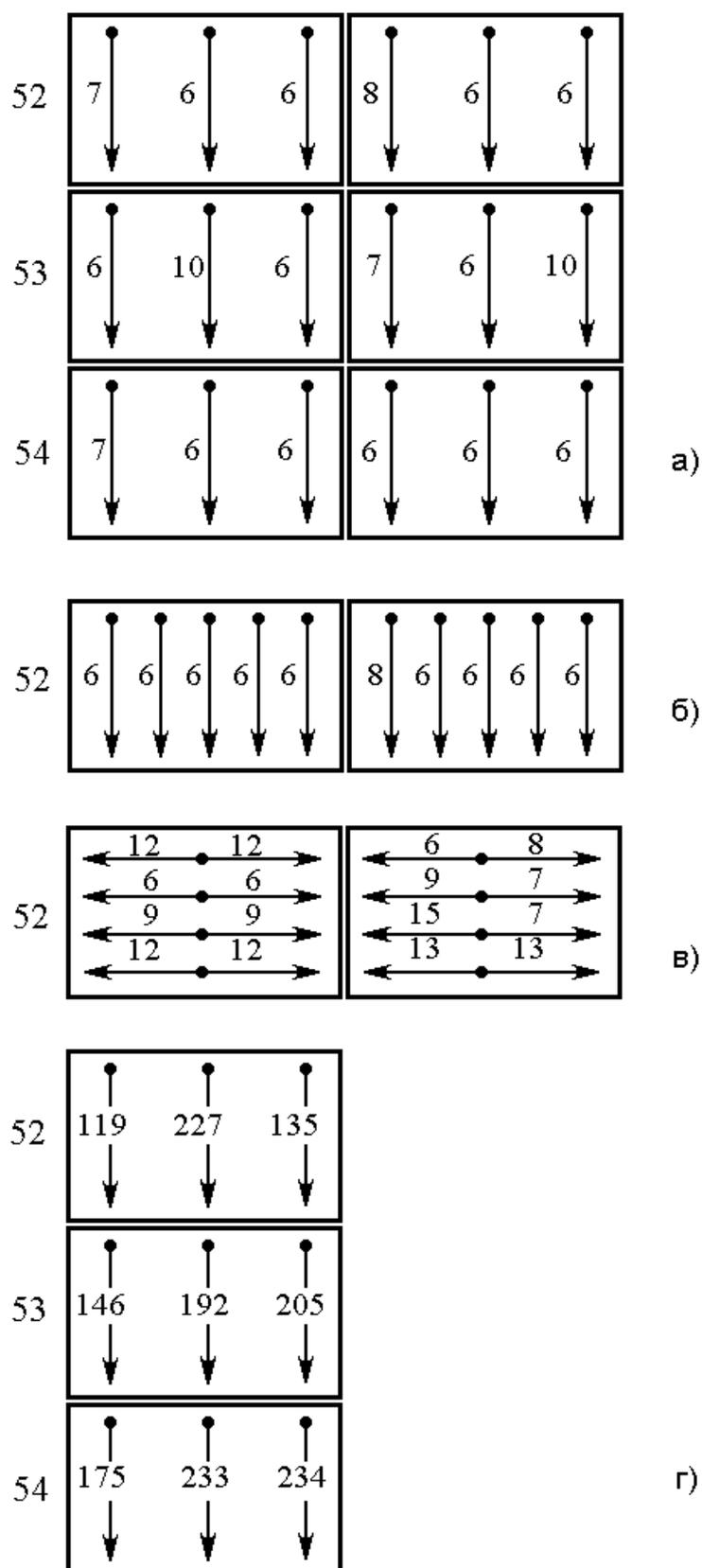


Рисунок 7.1 – Методика испытаний тубинговой крепи 1-го перегона Днепропетровского метрополитена: а), б) и в) – прибором ИСК-1Ш (уровень максимальной амплитуды в условных единицах); г) прибором «Дикон» (количество периодов собственных колебаний при ударе)

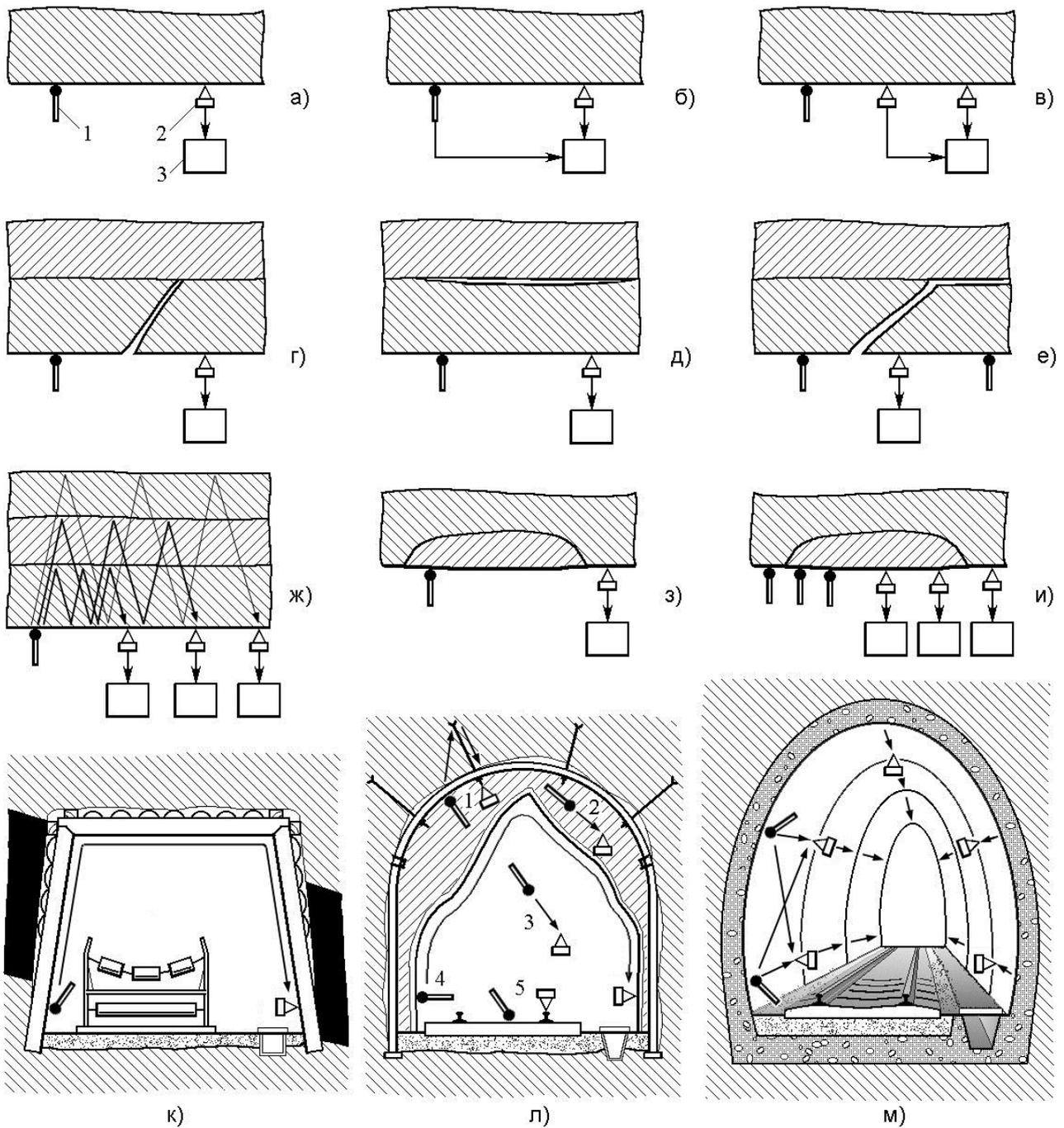


Рисунок 7.2 – Виброакустический контроль структурных элементов породного массива и конструкций подземных сооружений: а) без измерения силы удара (1 – ударник, 2 – сейсмоприемник, 3 – прибор-индикатор); б) с учетом силы удара; в) с контролем силы удара по независимому параллельному каналу; г) при поиске трещин; д) при поиске отслоений; е) при круговом зондировании опасного закола; ж) при глубинном зондировании структуры; з) при поиске ложной кровли; и) при глубинном зондировании ложной кровли; к) при контроле состояния деревянной крепи; л) при контроле состояния металлической крепи (1 – анкерной крепи, 2 – перекрепления, 3 – забоя выработки, 4 – крепи в целом, 5 – монолитности полотна); м) при контроле капитальных бетонных выработок и железнодорожных тоннелей

Для оценки состояния крепи и пород в определенном месте, как правило, достаточно выполнить измерения на 3-7 арках. Количество точек измерений зависит от сечения и периметра выработки. В выработках небольшого сечения достаточно 3-5 точек, равномерно расположенных на образующей арки, рис. 7.3. В выработках большего сечения выполняется до семи измерений. Для обеспечения сопоставимости результатов и для сравнения их с экспертными базами данных точки измерений в ряду арок размещают в зависимости от необходимой детальности контроля с одинаковой базой профилирования, рис. 7.2, м. Отклонение оси датчика от нормали к плоскости поверхности объекта не должно превышать 15-20°. Направление удара также должно быть перпендикулярным поверхности объекта. Поверхности ударника и датчика должны быть очищены от загрязнений. Ряд арок (ряд однотипных объектов) контролируется с применением однотипных датчиков, приборов и ударников одинаковой массы.

Для контроля состояния протяженной выработки, как правило, достаточно выделить частоту максимума спектральной плотности и определить амплитуду сигнала на этой частоте. Как показали испытания, спектр акустического сигнала сильно нагруженного крепления, жестко взаимодействующего с массивом посредством механической связи, имеет пик в области 2-3 кГц. При ослаблении контакта крепления с породами максимум спектральной плотности смещается в область низких частот, а время и амплитуда колебаний увеличиваются, что связано с переходом от волнового процесса переноса энергии к колебательному (см. раздел 4.1). Например, на участке 230-300 м от начала квершлага (рис. 7.4, а) металлическая крепь практически находится в свободном ненагруженном состоянии, арки крепи легко прозвучиваются по всей длине, показания прибора максимальные. По внешнему виду состояние крепи хорошее, однако забутовка отсутствует, поэтому крепь практически не несет нагрузки. В этой связи нагрузка перераспределилась на соседний участок, в котором крепь находится в весьма нагруженном состоянии, деревянные затяжки раздавлены, имеются повреждения металлической крепи (310-380 м). Для простоты привязки и исключения субъективного фактора при оценке состояния крепи простукивание проводилось в местах маркировки пикетов. Установлено, что 20% крепления находится в ненагруженном состоянии.

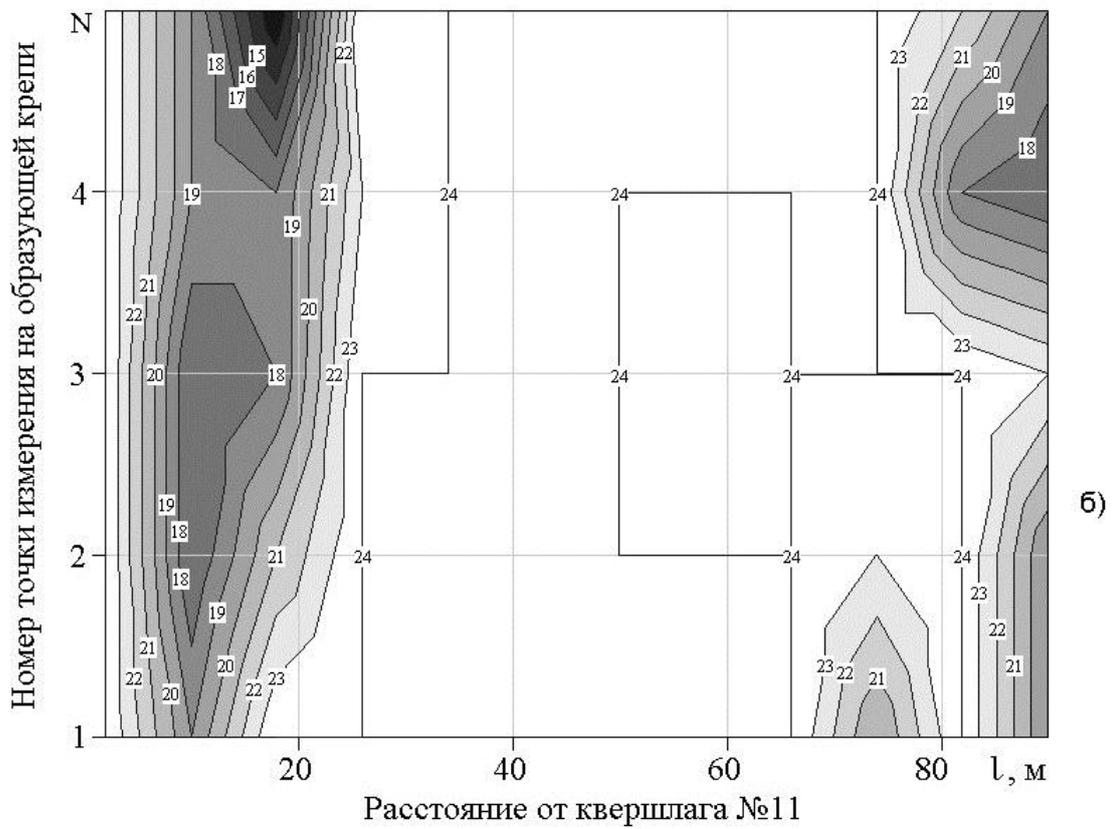
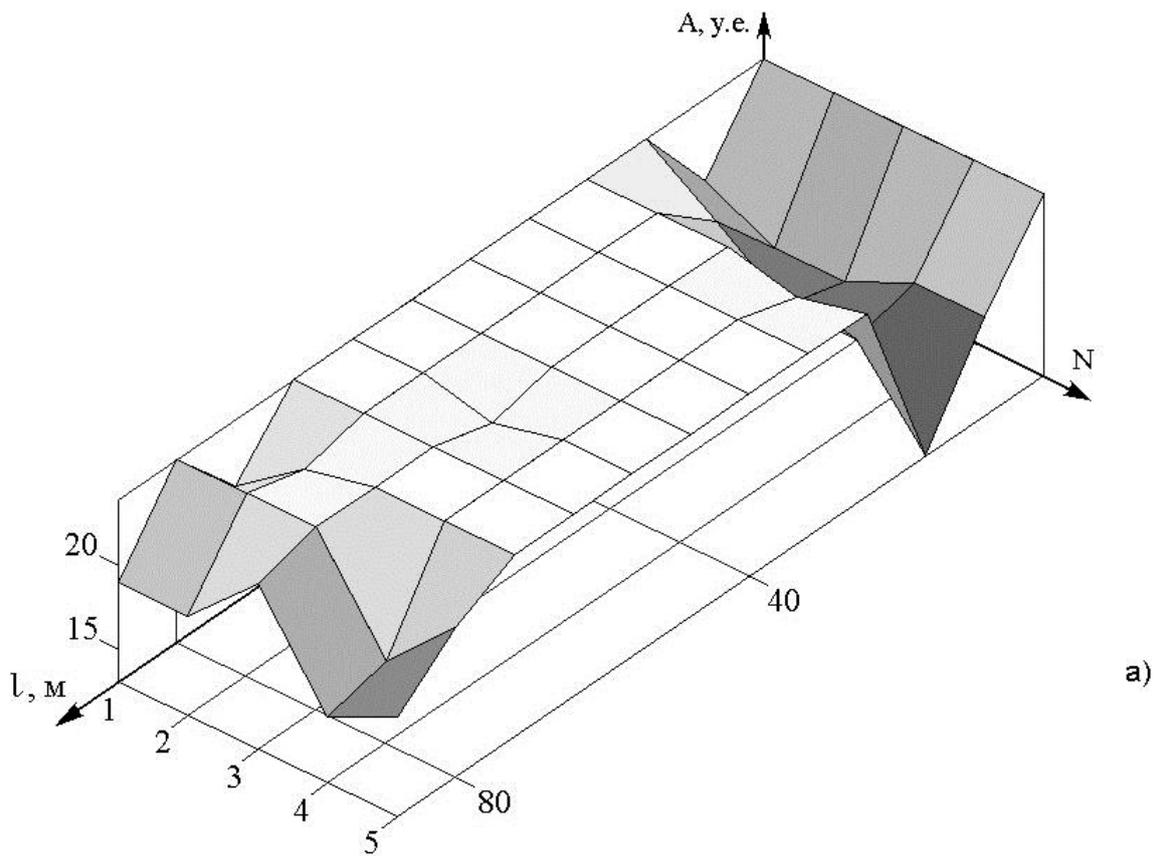


Рисунок 7.3 – Результаты виброакустического контроля крепи полевого штрека пласта  $l_3$  шахты «Центральная», г. Ирмино: а) изменение максимума спектральной плотности; б) зоны повышенного нагружения крепи

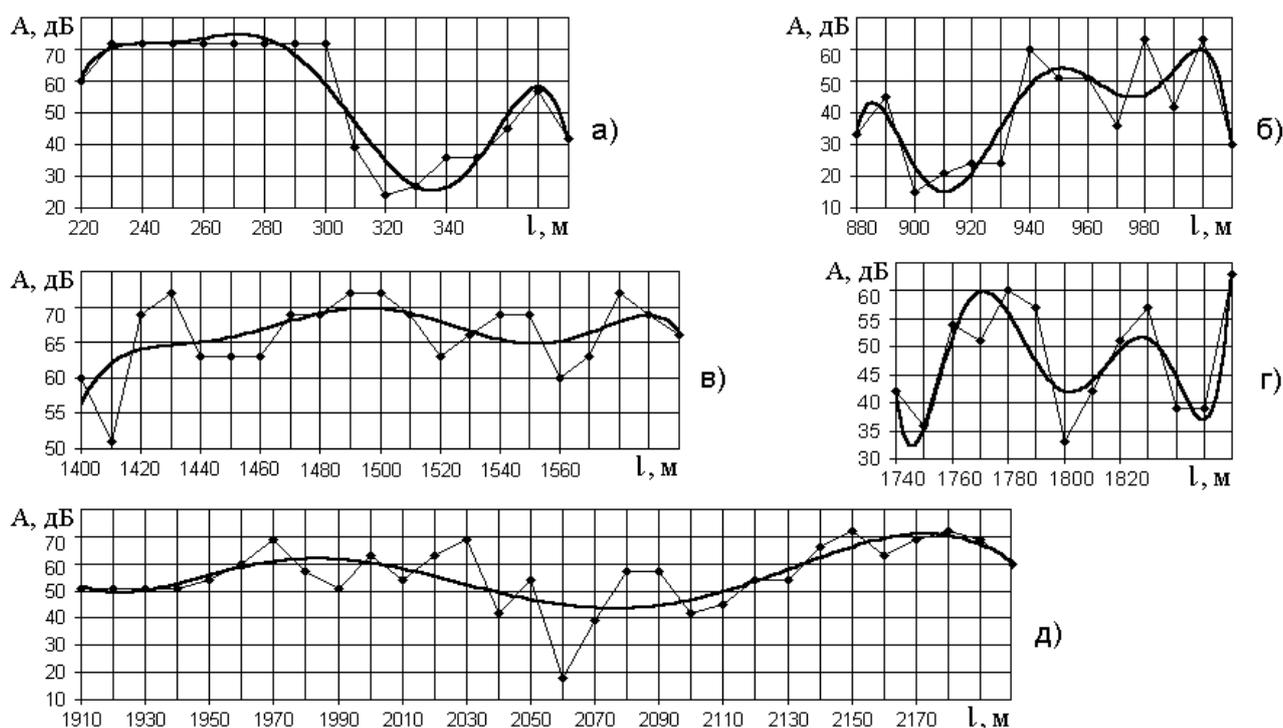


Рисунок 7.4 – Графики изменения величины максимума спектральной плотности сигнала вдоль квершлага 600, горизонт 2, рудника №1 (плавные линии – полиномиальные ряды шестой степени): а) участок перехода металлической крепи АП от ненагруженного состояния к нагруженному; б) участок, закрепленный деревянной крепью; в) участок средней нагруженности и нормального состояния металлической крепи; г) участок сильной нагруженности и деформированной металлической крепи; д) участок крепи с переменной нагруженностью («волны» горного давления)

При хорошей работе замков податливости ненагруженная крепь может использоваться значительное время без перекрепления, однако необходим периодический ее контроль. Амплитуда сигнала отклика на удар для деревянного крепления меньше, чем для металлического, рис. 7.4, б. При возникновении перекосов, асимметрии нагрузок происходит разрушение замков податливости и крепи, что снижает ее несущую способность и приводит к задавливанию выработки. Такие участки нуждаются в дополнительном подкреплении или перекреплении, рис. 7.4, г. При проведении перекрепления выработки простукивание арок крепи необходимо проводить подряд для детальной оценки ее состояния и осуществления локального ремонта.

Для определения закономерностей формирования нагрузок требуется статистическая обработка результатов измерений, которую легко осуществить с помощью разработанных программ

автоматизированной статистической обработки (раздел 5.3) и стандартных пакетов (MathCad, Excel), рис. 7.5.

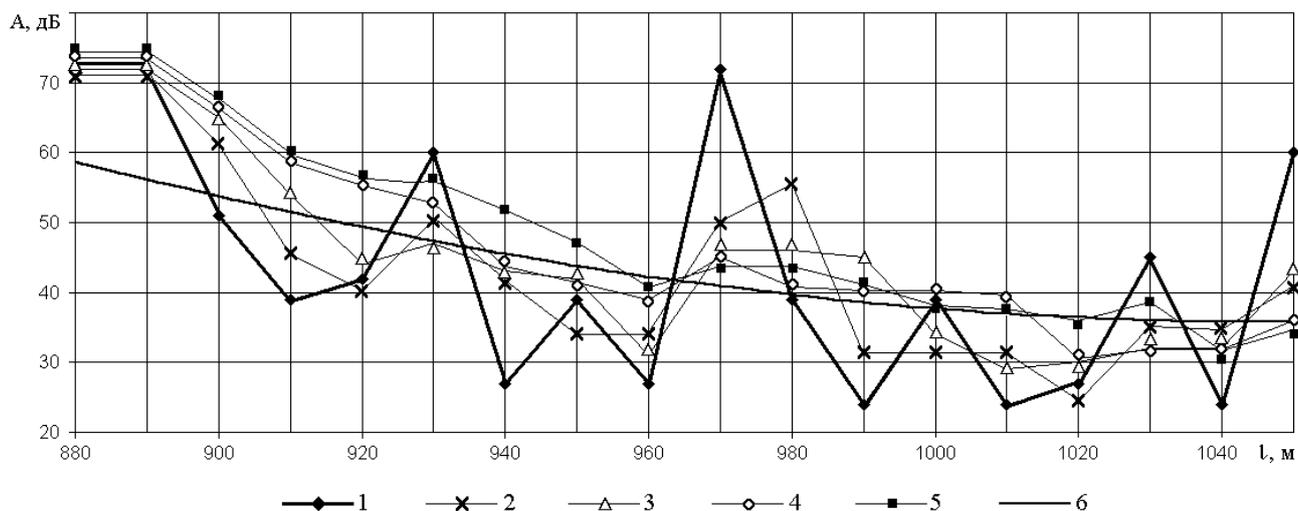


Рисунок 7.5 – Графики изменения величины максимума спектральной плотности сигнала вдоль квершлага 500 (деревянная крепь), горизонт 2, рудника №1: исходная (1) и линейно сглаженные ломаные по двум (2), трем (3), пяти (4) и семи (5) точкам; 6 – аппроксимация исходной ломаной полиномом шестой степени

Натурные исследования показали высокую эффективность регистрации спектрограмм для обнаружения скрытых заколов и отслоений при оборке кровли и определении участков обязательного перекрепления и опасных разрушений крепи, рис. 7.6, а, б, в, г. Применение методов автоматизированной обработки информации и наукоемких приборов оперативного виброакустического контроля позволяет эффективно оценить состояние системы «крепь - породный массив» в выработках большой протяженности, рис.7.2-7.6.

## 7.2 Контроль состояния тоннельных обделок и заобделочных пустот

Лоцманский железнодорожный тоннель пересекает водораздел рек Днепр и Мокрая Сура между станциями Днепропетровск-Южный и полустанок Встречный. Тоннель однопутный, его длина составляет 800 м, он проведен в лесовидных суглинках на глубине около 50 м. На уровне основания тоннеля с правой и левой сторон по ходу нумерации тоннельных колец расположены дренажные штольни, а также с левой стороны 4 дренажных колодца, диаметром около 6 м.

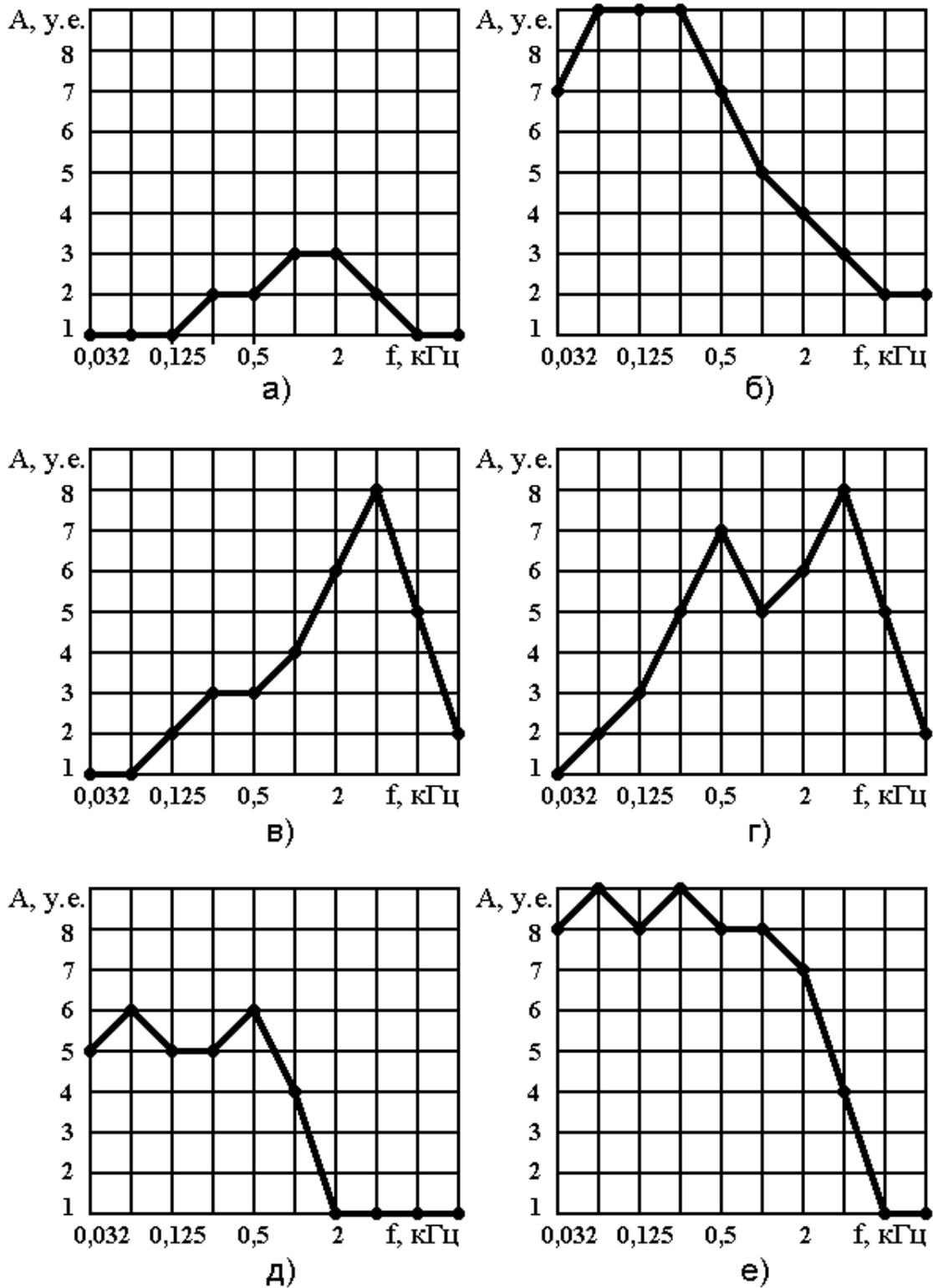


Рисунок 7.6 – Качественные спектрограммы акустических сигналов: отклики на ударное воздействие на нагруженную бетонную обделку или цельный скальный массив (а), опасный закол (б), отслоившуюся бетонную обделку тоннеля (в), отслоившуюся поврежденную обделку (г); спектрограмма акустического сигнала нормально работающего насоса (д) и насоса с изношенными подшипниками (е)

---

В основании тоннеля за обратным сводом находятся тяжелые водонепроницаемые глины, однако в боках и кровле тоннеля – водонасыщенные и водопроницающие суглинки и супеси, склонные к превращению в пльвуны. Сложность гидрогеологического состояния участка усугубилась возникшим оползнем, который перекрыл естественный сток грунтовых вод в балку. Водораздел перегружен водонесущими коммуникациями, состояние которых неизвестно, скорее всего - неудовлетворительное, поскольку водоприитоки в тоннель за последние 10 лет увеличились в 4 и более раз. В непосредственной близости от оси тоннеля расположены высотные здания, которые в любом случае попадают в зону возможных сдвижений, если они произойдут либо от выдавливания пльвуна при его водонасыщении, либо от обрушения грунтов в полости, образовавшиеся в результате постоянного выноса грунта в дренажные штольни и тоннель. Вынос грунта достигает не менее 60 т в месяц, зависит от изменения водоприитоков и гидрогеологической ситуации во времени и в пространстве. Прямое бурение скважин выявило наличие пустот вокруг тоннеля, найдена пустота над тоннелем высотой 1,7 м и шириной не менее 7,5 м. Скважины, которые пробурены непосредственно по оси тоннеля, практически не выявили ни пустот, ни зон обводнения, так как осевшие слои грунта прочно нагружают его в вертикальном направлении между почвой и кровлей. Скважинное бурение малоинформативно из-за его недостаточности для объекта такого масштаба, что связано с высокой стоимостью работ. Не изучен вопрос и вреда скважин, которые нарушают водонепроницающие слои и могут неуправляемо изменить гидрогеологический режим тоннеля, что опасно для устойчивости.

Визуальное предварительное обследование тоннеля и прилегающих территорий позволило установить:

Практически по всей длине тоннеля из-за обделки наблюдается поступление воды с разной интенсивностью. На многих крепежных кольцах (101-107, 118-123, 128 и др.) отмечается водоприиток на уровне пяты свода, струйное истечение воды наблюдается на кольцах 32, 45, 106, 117, 118, 123, 128, 129 и др.

Бетон свода тоннеля в результате многократного изменения температурно-влажностного режима подвержен гидратационным и коррозионным процессам, которые вызывают разуплотнение и разрыхление его структуры, снижение прочности и водонепроницаемости (кольца 45-47, 49-51, 94-96, 101-107, 112-129).

Сложность гидродинамической ситуации усугубляется наличием в воде большого количества хлоридов (150-330 мг/л), значительной коррозией и раскрытием бетонных стыков крепежных колец (14, 32, 45, 51, 54, 58, 67, 96, 101, 118, 123 и др.). Постоянные водопритоки в тоннель изменяют гидрогеомеханическую ситуацию в грунтах, прилегающих к тоннелю, вызывают приконтурные геофильтрационные процессы, сопровождающиеся суффозионным выносом грунтов и возможным изменением их несущей способности, что может проявиться в непрогнозируемом локальном силовом воздействии на тоннель (в результате обрушения грунта или перехода его в предельное состояние на участках интенсивного водоувлажнения). Недостаточная упорядоченность в отводе водопритоків из тоннеля может изменить физико-механические свойства насыпи, а также усилить фильтрационные деформации грунтов под обратным сводом в условиях динамических нагрузок от движущихся транспортных средств.

В этой связи привлечены методы виброакустики, позволившие в результате комплексных исследований оценить состояние объекта в целом. На рис. 7.7 и 7.8 представлены усредненные результаты виброакустических исследований вдоль тоннеля. Измерения преднамеренно выполнены одновременно двумя приборами с различными входными датчиками (частота 25 и 40 кГц), чтобы исключить влияние незначительных случайных трещин, включений или других аномалий. В случае возникновения каких-либо неувязок в показаниях приборов производилось повторное простукивание два-три раза.

Как следует из рис. 7.8, основные отклонения частоты максимума спектральной плотности сигнала от доминирующих средних значений происходят в сторону высоких частот. В сторону же низких частот наблюдаются незначительные отклонения. Это свидетельствует о наличии участков высокой пригруженности крепи со стороны массива и, в то же время, об отсутствии крупных заколов в обделке. Такие заколы не обнаружены и при визуальном осмотре, однако, из-за сдвижения в целом колец под нагрузкой и нарушения габаритов для подвижного состава одна часть колец ранее заменялась, а другая часть уже имеет существенные подвижки по отношению к оси тоннеля.

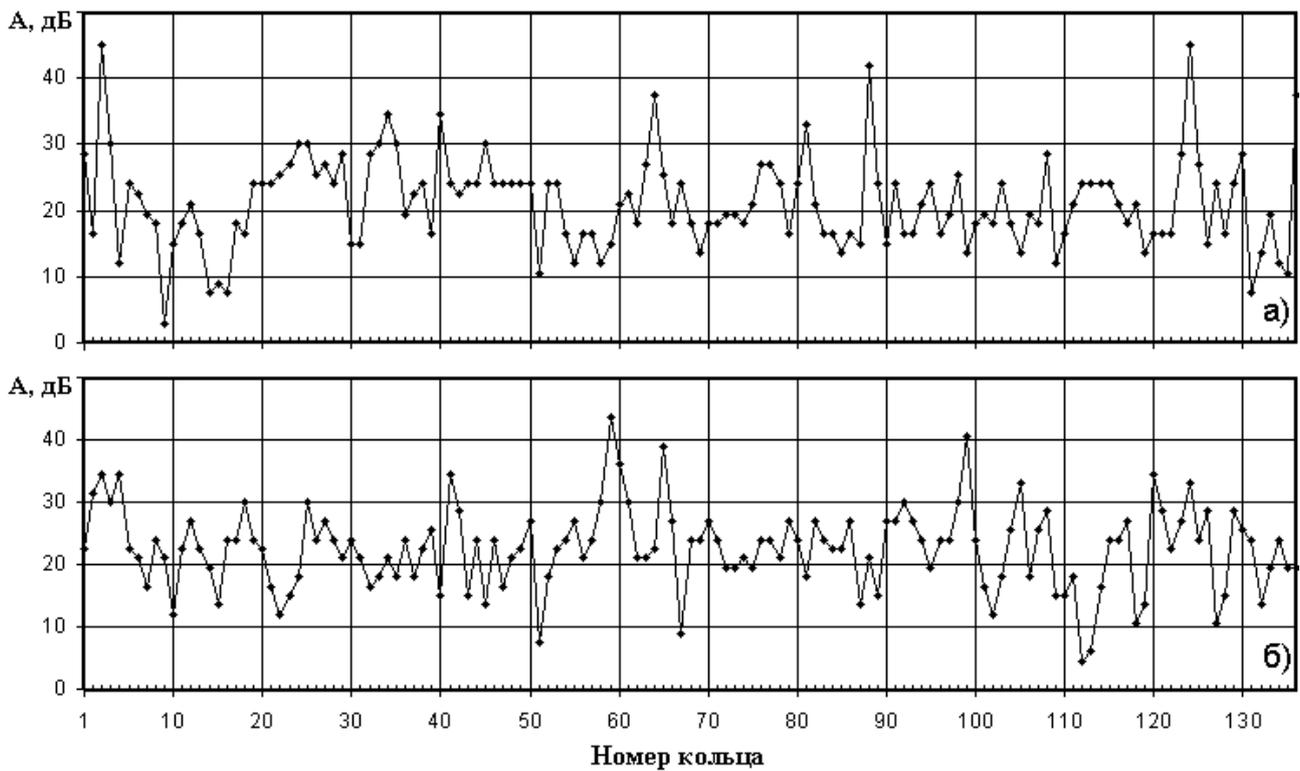


Рисунок 7.7 – Графики изменения величины максимума спектральной плотности сигнала вдоль Лоцманского железнодорожного тоннеля: а) левая сторона по ходу нумерации колец; б) правая сторона

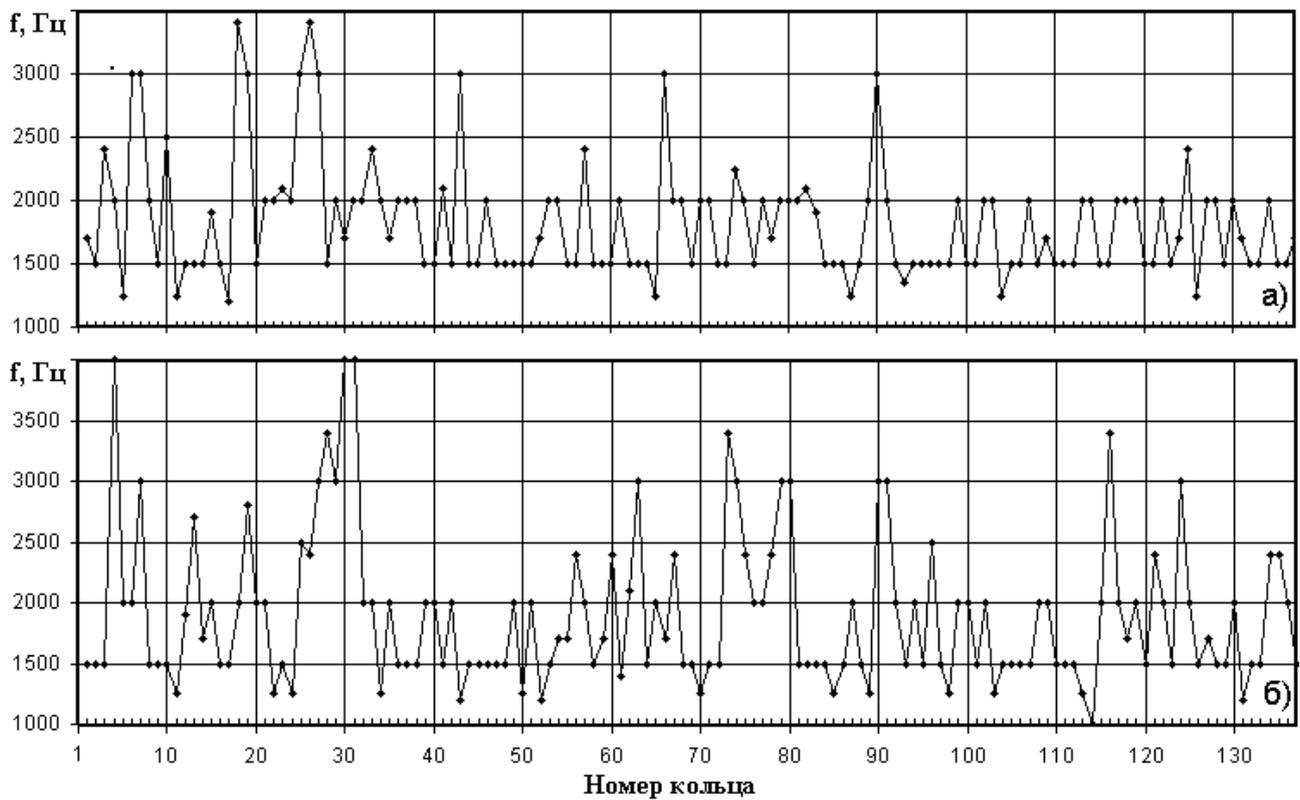


Рисунок 7.8 – Графики изменения частоты максимума спектральной плотности сигнала вдоль Лоцманского железнодорожного тоннеля: а) левая сторона по ходу нумерации колец; б) правая сторона

Для характеристики локальной изменчивости свойств конкретных участков на фоне общей закономерности изменения средних параметров по всему тоннелю построены графики абсолютных отклонений (и их модулей) величины амплитуды и частоты от соответствующих средних значений, рис. 7.9 и 7.10. Если абсолютные отклонения характеризуют изменение параметров обделки по всей длине тоннеля, то максимальные значения модулей отклонений локализуют наиболее нестабильные (опасные) участки.

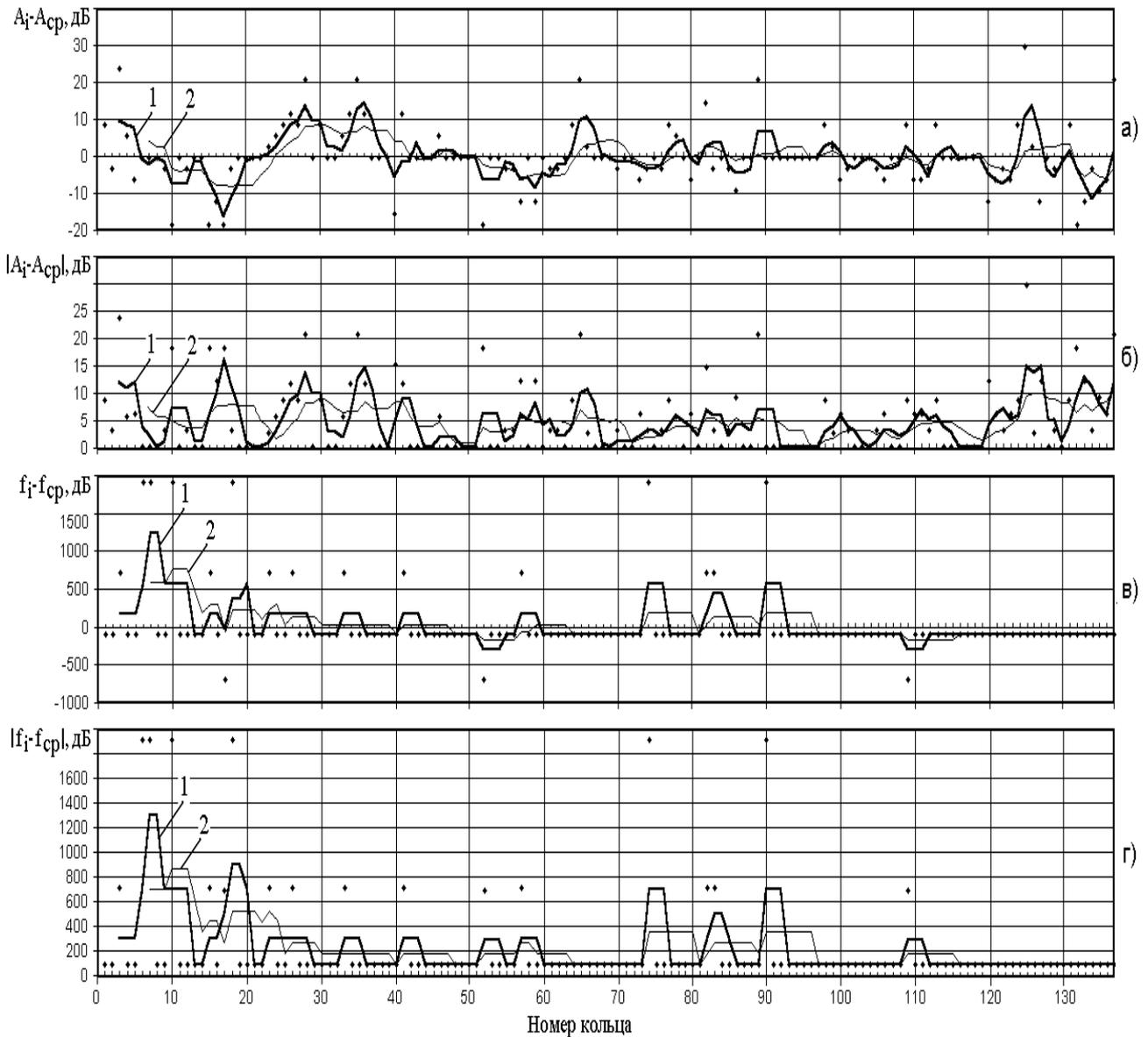


Рисунок 7.9 – Графики абсолютного отклонения величин амплитуды (а, б) и частоты (в, г) максимума спектральной плотности сигнала от соответствующих средних значений вдоль левой стороны по ходу нумерации колец обделки Лоцманского железнодорожного тоннеля (1 – линейное сглаживание по трем точкам, 2 – по семи точкам)

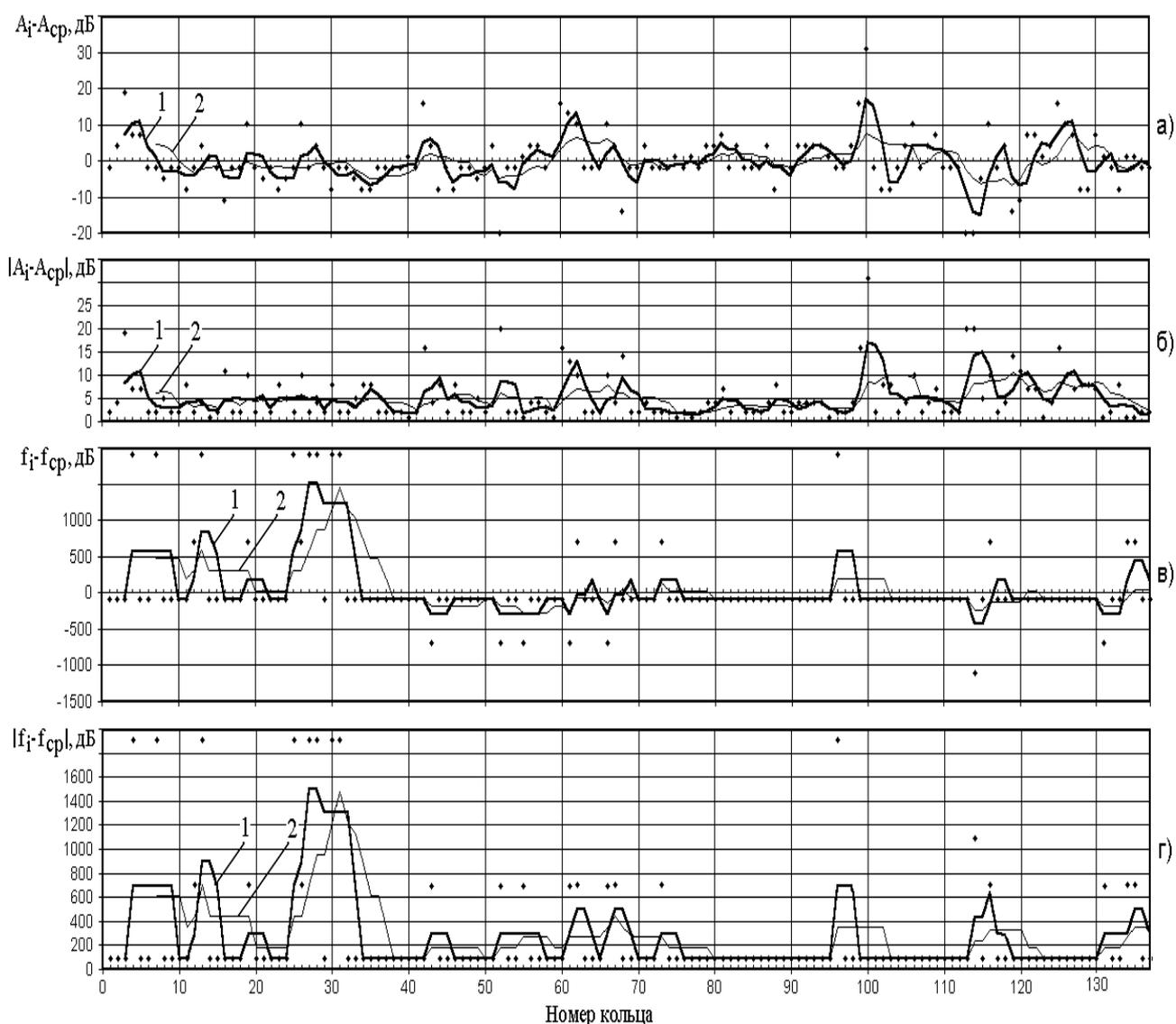


Рисунок 7.10 – Графики абсолютного отклонения величин амплитуды (а, б) и частоты (в, г) максимума спектральной плотности сигнала от соответствующих средних значений вдоль правой стороны по ходу нумерации колец обделки Лоцманского железнодорожного тоннеля (1 – линейное сглаживание по трем точкам, 2 – по семи точкам)

В результате виброакустических исследований установлено:

1. Массив грунтов вокруг тоннеля неоднороден, отличается высокой изменчивостью свойств, которые в первую очередь определяют изменчивость контактных условий между обделкой и массивом, рис. 7.7 –7.10.

2. В нижней части тоннеля определены участки повышенного горного давления со стороны массива, которые в основном приурочены с внутренней стороны тоннеля зонам повышенной влажности обделки и фильтрации через нее, что свидетельствует о выдавливании грунта и напоре воды в сторону тоннеля.

3. Статистической обработкой результатов измерений установлено, что в средней части тоннеля и, в особенности в правой части в конце тоннеля имеются участки, в которых пустоты объединились в сплошную пустоту. Обделка на этих участках, как правило, сухая или имеет пониженную увлажненность, поскольку вода промыла для себя проходы и свободно вытекает в дренажные штольни, о чем свидетельствует и повышенный водоприток, рис. 7.10.

4. Из-за высокого затухания сигнала простукивание по всему кольцу обделки оказалось затруднительным, однако, имеются участки, на которых кольца легко простукиваются. В то же время имеются участки, на которых даже на малой базе вверху тоннеля верхняя часть тоннеля с дрезины не простукивается. Это говорит о том, что эти участки сильно пригружены, т. е. по бокам тоннеля имеются пустоты, нижняя часть массива грунтов, прилегающего к тоннелю, не несет нагрузку, поэтому вверху на этих участках грунт просел и сильно нагрузил тоннельную обделку. При этом тоннель оказался зажатым между прочными водонепроницаемыми глинами почвы и осевшими пластами кровли, рис. 7.11.

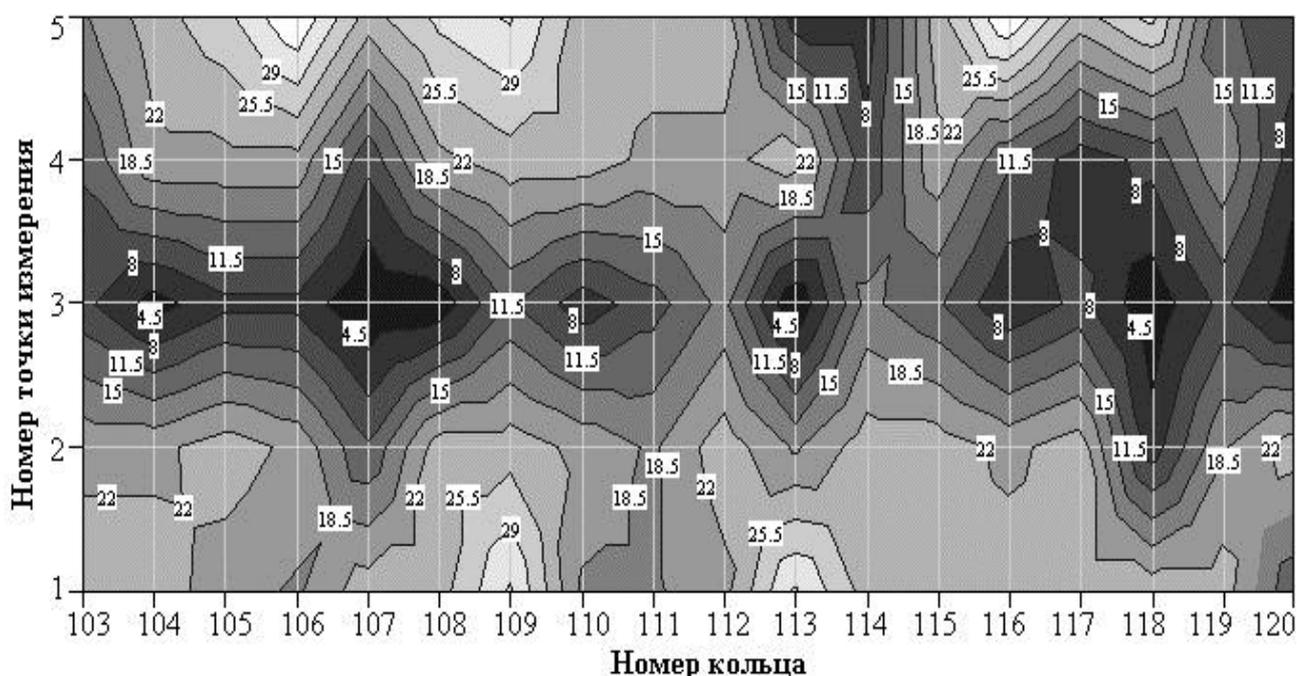


Рисунок 7.11 – Карта распределения зон повышенной нагруженности тоннельной обделки (темные участки) и заобделочных пустот (светлые участки) вдоль Лоцманского железнодорожного тоннеля (нумерация точек измерения слева направо)

---

Ремонт крепи тоннеля должен предусматривать комплексный подход:

1. Необходимо снизить водопритоки в тоннель в основном не за счет герметизации обделки, а в первую очередь за счет снижения поступления технической воды.

2. Необходимо сохранить дренажную систему, провести ее обследование и ремонт.

3. Тампонаж больших пустот следует проводить в два этапа. На первом этапе при строгом контроле за сохранением дренажной системы под малым давлением (4-10 ат) необходимо закачать песчано-цементную смесь для упрочнения обделки и обеспечения ее гидроизоляции. На втором этапе после окончания процесса цементации необходимо закачать песчано-глинистую смесь под более высоким давлением (>10 ат) до наиболее полного заполнения пустот, по-прежнему контролируя состояние дренажной системы.

На Днепропетровском метрополитене проведен контроль пустотности заобделочного пространства в зонах обильных водопритоков, в том числе вокруг тубинговой крепи, прочности и цельности пассажирской платформы, а также качества обделки заобделочного пространства как после проведения бетонных работ, так и перед бетонированием. Определены пустоты, достигающие по площади нескольких десятков квадратных метров в зонах обильных водопритоков, образовавшиеся как в результате размыва, так и из-за низкого качества проведенных бетонных работ. Качество предварительной обделки отслоений и заколов скальных пород перед проведением обделочных работ резко снижается в нижней части станции и подводных тоннелей, где породы не обваливаются за счет собственного веса и проведение обделки вручную затруднительно, а, следовательно, эти участки автоматически становятся зонами накопления воды. Аналогично зоны пустотности привязаны к местам сопряжения выработок, всевозможным «неудобным» местам, что весьма опасно в связи с повышением горного давления.

### **7.3 Спектральный анализ динамических процессов в сложных системах**

Для сохранения устойчивости сложной геомеханической динамической системы необходим оперативный или непрерывный контроль, который хотя и не всегда позволяет исключить аварийное

стечение обстоятельств, но может предупредить об изменениях в системе, а при принятии своевременных экспертных решений – повысить порог ее устойчивости. В идеале возможен учет как всех причинно-следственных связей, так и тенденции накопления случайных повреждений, что необходимо для заблаговременной остановки и ремонта системы.

В сложных условиях преимущество за непрерывным контролем, однако стоимость его очень высокая, контролировать все технологические цепочки практически невозможно. Поэтому важнейшим элементом контроля динамических процессов является спектральный анализ – мощный и универсальный инструмент интегрального изучения горных технических систем [18, 37, 75, 108, 122].

Поскольку хаотические процессы преимущественно характерны для трехмерных структур, часто изменяют направленность колебаний, то их спектральный контроль необходимо проводить по взаимно перпендикулярным направлениям двухканальными (многоканальными) системами. Это позволяет обнаруживать возможные фазовые переходы, которые, как отмечалось во втором разделе, характерны для особо опасного детерминированного хаоса. Кроме того, хаотическое движение отличается наличием непрерывного спектра частот, расположенного ниже вынуждающей (резонансной) частоты бифуркации, и оно, как правило, опасно для контролируемого устройства, поэтому любые изменения исходных линейчатых спектральных характеристик свидетельствуют об отклонениях в работе динамической системы.

Преобразование сигналов из временной области в частотную должно выполняться в режиме реального времени, поэтому актуальной является задача разработки математических методов спектрального анализа, обеспечивающих достаточную точность при минимальном объеме вычислительных операций без использования комплексных чисел и учитывающих особенности контролируемых технологических процессов и электромеханических объектов.

Ранее для спектрального анализа было предложено применять оптимизированный для вычислений в двоичном коде метод 12-ти ординат [108]. Его преимуществом по сравнению с известными алгоритмами быстрого дискретного преобразования Фурье (БПФ) является то, что вычисления выполняются только над действительными числами. Недостаток предложенного подхода

заключается в возможности определения амплитуд и фаз только лишь 5-ти гармонических составляющих. Для повышения информативности контроля предложен упрощенный метод обработки 24-х ординат сигнала, который просто реализуется на микроконтроллере, но достаточный для технического контроля [58].

Представим анализируемую функцию  $y$  в виде конечного ряда:

$$y = f(x) = a_0 + \sum_{i=1}^{12} a_i \cos ix + \sum_{i=1}^{11} b_i \sin ix, \quad (7.1)$$

где  $a_i, b_i$  – коэффициенты гармоник,  $ix = 2\pi \frac{t}{T_i}$ ,  $T_i$  – период колебаний  $i$ -й гармонической составляющей.

Так как период функции  $y$ , равный  $2\pi$ , разделен на 24 части, то интервал дискретизации аргумента  $x$  равен  $15^\circ$ , т.е.  $x$  получает значения  $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ, 105^\circ, 120^\circ, 135^\circ, 150^\circ, 165^\circ, 180^\circ, 195^\circ, 210^\circ, 225^\circ, 240^\circ, 255^\circ, 270^\circ, 285^\circ, 300^\circ, 315^\circ, 330^\circ, 345^\circ$ . Определены аналитические представления базисных функций разложения для приведенного выше ряда аргументов, в результате чего получены следующие значения:  $0; \pm \frac{\sqrt{2-\sqrt{3}}}{2}; \pm \frac{1}{2}; \pm \frac{\sqrt{2}}{2}; \pm \frac{\sqrt{3}}{2}; \pm \frac{\sqrt{2+\sqrt{3}}}{2}; \pm 1$ .

Для определения коэффициентов гармоник выполним ряд подстановок:

$$\begin{cases} y_0 + y_{12} = n_0; \\ y_i + y_{24-i} = n_i, \quad \text{где } i = 1, 2, \dots, 11; \\ y_0 - y_{12} = m_0; \\ y_i - y_{24-i} = m_i, \quad \text{где } i = 1, 2, \dots, 11; \end{cases} ; \quad (7.2)$$

$$\begin{cases} n_0 + n_6 = p_0; \\ n_i + n_{12-i} = p_i, \quad m_i + m_{12-i} = v_i, \quad \text{где } i = 1, 2, \dots, 5; \\ n_0 - n_6 = q_0; \\ n_i - n_{12-i} = q_i, \quad m_i - m_{12-i} = u_i \quad \text{где } i = 1, 2, \dots, 5; \end{cases}$$

$$\begin{cases} p_1 + p_5 = k_1, & u_1 + u_5 = d_1; \\ p_2 + p_4 = k_2, & u_2 + u_4 = d_2; \\ p_1 - p_5 = l_1, & u_1 - u_5 = h_1; \\ p_2 - p_4 = l_2, & u_2 - u_4 = h_2; \end{cases} \quad \begin{cases} k_1 + k_2 = s, & h_1 + h_2 = w; \\ k_1 - k_2 = t, & h_1 - h_2 = c. \end{cases}$$

Для вычисления коэффициентов в двоичном коде с помощью однокристальных микроконтроллеров предложено использовать следующую вычислительную схему:

$$\begin{array}{cccccccccccc} y_0 & y_1 & y_2 & y_3 & y_4 & y_5 & y_6 & y_7 & y_8 & y_9 & y_{10} & y_{11} & [8, 10, 12, 16 \text{ бит}] \\ \hline y_{12} & y_{23} & y_{22} & y_{21} & y_{20} & y_{19} & y_{18} & y_{17} & y_{16} & y_{15} & y_{14} & y_{13} & \\ \hline n_0 & n_1 & n_2 & n_3 & n_4 & n_5 & n_6 & n_7 & n_8 & n_9 & n_{10} & n_{11} & \text{суммы} & [9, 11, 13, 17] \\ m_0 & m_1 & m_2 & m_3 & m_4 & m_5 & m_6 & m_7 & m_8 & m_9 & m_{10} & m_{11} & \text{разности} & \\ \hline n_0 & n_1 & n_2 & n_3 & n_4 & n_5 & m_1 & m_2 & m_3 & m_4 & m_5 & & [9, 11, 13, 17] \\ n_6 & n_{11} & n_{10} & n_9 & n_8 & n_7 & m_{11} & m_{10} & m_9 & m_8 & m_7 & & \\ \hline p_0 & p_1 & p_2 & p_3 & p_4 & p_5 & v_1 & v_2 & v_3 & v_4 & v_5 & \text{суммы} & [10, 12, 14, 18] & (7.3) \\ q_0 & q_1 & q_2 & q_3 & q_4 & q_5 & u_1 & u_2 & u_3 & u_4 & u_5 & \text{разности} & \\ \hline p_0 & p_1 & p_2 & u_1 & u_2 & & & & & & & k_1 & h_1 & [11, 13, 15, 19] \\ p_3 & p_5 & p_4 & u_5 & u_4 & & & & & & & k_2 & h_2 & \\ \hline k_0 & k_1 & k_2 & d_1 & d_2 & \text{суммы} & & & & & s & w & \text{суммы} & [12, 14, 16, 20] \\ l_0 & l_1 & l_2 & h_1 & h_2 & \text{разности} & & & & & t & c & \text{разности} & \end{array}$$

Величины, входящие в окончательные формулы, в данной схеме выделены полужирным шрифтом. В квадратных скобках приведены разрядности промежуточных переменных при использовании 8-, 10-, 12- и 16-разрядных входных данных. Таким образом, максимальная разрядность целочисленных переменных составляет 20 бит, что позволяет производить промежуточные вычисления над 3-байтными операндами. Однако, для наиболее распространенных аналого-цифровых преобразователей (АЦП), интегрированных в кристалл ОМК общего назначения, разрядность представления данных обычно составляет 8...12 бит, что позволяет выполнять все промежуточные вычисления над двухбайтными операндами. Отрицательные числа могут быть представлены в дополнительном коде, либо модулем числа с использованием старшего бита как знакового.

Окончательные формулы для определения коэффициентов гармонических составляющих примут вид:

$$\begin{aligned}
a_0 &= \frac{1}{24}(k_0 + s); & a_1 &= \frac{1}{12} \left( m_0 + \frac{\sqrt{2+\sqrt{3}}}{2} q_1 + \frac{\sqrt{3}}{2} q_2 + \frac{\sqrt{2}}{2} q_3 + \frac{1}{2} q_4 + \frac{\sqrt{2-\sqrt{3}}}{2} q_5 \right); \\
a_2 &= \frac{1}{12} \left( q_0 + \frac{\sqrt{3}}{2} l_1 + \frac{1}{2} l_2 \right); & a_3 &= \frac{1}{12} \left( m_0 + \frac{\sqrt{2}}{2} q_1 - \frac{\sqrt{2}}{2} q_3 - q_4 - \frac{\sqrt{2}}{2} q_5 \right); \\
a_4 &= \frac{1}{12} \left( l_0 + \frac{1}{2} t \right); & a_5 &= \frac{1}{12} \left( m_0 + \frac{\sqrt{2-\sqrt{3}}}{2} q_1 - \frac{\sqrt{3}}{2} q_2 - \frac{\sqrt{2}}{2} q_3 + \frac{1}{2} q_4 + \frac{\sqrt{2+\sqrt{3}}}{2} q_5 \right); \\
a_6 &= \frac{1}{12} (q_0 - l_2); & a_7 &= \frac{1}{12} \left( m_0 - \frac{\sqrt{2-\sqrt{3}}}{2} q_1 - \frac{\sqrt{3}}{2} q_2 + \frac{\sqrt{2}}{2} q_3 + \frac{1}{2} q_4 - \frac{\sqrt{2+\sqrt{3}}}{2} q_5 \right); \\
a_8 &= \frac{1}{12} \left( k_0 - \frac{1}{2} s \right); & a_9 &= \frac{1}{12} \left( m_0 - \frac{\sqrt{2}}{2} q_1 + \frac{\sqrt{2}}{2} q_3 - q_4 + \frac{\sqrt{2}}{2} q_5 \right); \\
a_{10} &= \frac{1}{12} \left( q_0 - \frac{\sqrt{3}}{2} l_1 + \frac{1}{2} l_2 \right); \\
a_{11} &= \frac{1}{12} \left( m_0 - \frac{\sqrt{2+\sqrt{3}}}{2} q_1 + \frac{\sqrt{3}}{2} q_2 - \frac{\sqrt{2}}{2} q_3 + \frac{1}{2} q_4 - \frac{\sqrt{2-\sqrt{3}}}{2} q_5 \right); & a_{12} &= \frac{1}{24} (l_0 - t); \\
b_1 &= \frac{1}{12} \left( m_6 + \frac{\sqrt{2-\sqrt{3}}}{2} v_1 + \frac{1}{2} v_2 + \frac{\sqrt{2}}{2} v_3 + \frac{\sqrt{3}}{2} v_4 + \frac{\sqrt{2+\sqrt{3}}}{2} v_5 \right); \\
b_2 &= \frac{1}{12} \left( \frac{1}{2} d_1 + \frac{\sqrt{3}}{2} d_2 + u_3 \right); & b_3 &= \frac{1}{12} \left( -m_6 + \frac{\sqrt{2}}{2} v_1 + v_2 + \frac{\sqrt{2}}{2} v_3 - \frac{\sqrt{2}}{2} v_5 \right); \\
b_4 &= \frac{\sqrt{3}}{24} w; & b_5 &= \frac{1}{12} \left( m_6 + \frac{\sqrt{2+\sqrt{3}}}{2} v_1 + \frac{1}{2} v_2 - \frac{\sqrt{2}}{2} v_3 - \frac{\sqrt{3}}{2} v_4 + \frac{\sqrt{2-\sqrt{3}}}{2} v_5 \right); \\
b_6 &= \frac{1}{12} (d_1 - u_3); & b_7 &= \frac{1}{12} \left( -m_6 + \frac{\sqrt{2+\sqrt{3}}}{2} v_1 - \frac{1}{2} v_2 - \frac{\sqrt{2}}{2} v_3 + \frac{\sqrt{3}}{2} v_4 + \frac{\sqrt{2-\sqrt{3}}}{2} v_5 \right); \\
b_8 &= \frac{\sqrt{3}}{24} c; & b_9 &= \frac{1}{12} \left( m_6 + \frac{\sqrt{2}}{2} v_1 - v_2 + \frac{\sqrt{2}}{2} v_3 - \frac{\sqrt{2}}{2} v_5 \right); \\
b_{10} &= \frac{1}{12} \left( \frac{1}{2} d_1 - \frac{\sqrt{3}}{2} d_2 + u_3 \right); \\
b_{11} &= \frac{1}{12} \left( -m_6 + \frac{\sqrt{2-\sqrt{3}}}{2} v_1 - \frac{1}{2} v_2 + \frac{\sqrt{2}}{2} v_3 - \frac{\sqrt{3}}{2} v_4 + \frac{\sqrt{2+\sqrt{3}}}{2} v_5 \right).
\end{aligned} \tag{7.4}$$

Используя полученные коэффициенты гармоник  $a_i$  и  $b_i$ , можем определить амплитуды гармоник и коэффициент несинусоидальности контролируемого сигнала.

$$A_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2}, \quad K_{НС} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{U_{ном}} 100, \quad (7.5)$$

где  $U_i$  - действующее значение напряжения  $i$ -й гармоники в исследуемом напряжении;  $n$  - номер последней из учитываемых гармоник.

Для выпрямленных сигналов можно определить коэффициент пульсаций по гармонике максимальной амплитуды и по сумме 11 гармоник [108]:

$$k_{П} = \frac{A_i^{\max}}{a_0}, \quad k_{П11} = \frac{\sum_{i=1}^{11} A_i}{a_0}, \quad (7.6)$$

где  $k_{П}$ ,  $k_{П11}$  - коэффициент пульсаций,  $a_0$  - постоянная составляющая.

При спектральном анализе по методу 24 ординат, сигнал не должен содержать гармоники с частотой большей, чем частота 11 гармоники. Поэтому необходимо выполнить сглаживание сигнала с шириной окна  $n/24$  точек. Например, если на один период сигнала приходится 672 отсчета, а нужно использовать 24 ординаты, то следует выполнить сглаживание по  $\frac{672}{24} = 28$  точкам. Для этого использованы выражения:

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{k=n-(13-i)}^{n-1} y_k + \sum_{k=0}^{14+i} y_k}{28} \quad \text{при} \quad i=0..12, \quad \bar{y}_i = \frac{\sum_{i=14}^{i+14} y_i}{28}, \quad (7.7)$$

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{k=i-13}^i y_k + \sum_{k=i}^{n-1} y_k + \sum_{k=0}^{14-(n-i)} y_k}{28} \quad \text{при} \quad (n-14)..(n-1),$$

где  $k$  - промежуточная индексная переменная.

Формулы (7.7) выведены исходя из соображения, что для получения начальных усредненных ординат периодического сигнала можно использовать конечные точки периода. Аналогично, для

получения усредненных ординат периодического сигнала в конце периода можно использовать начальные точки (рис. 7.12).

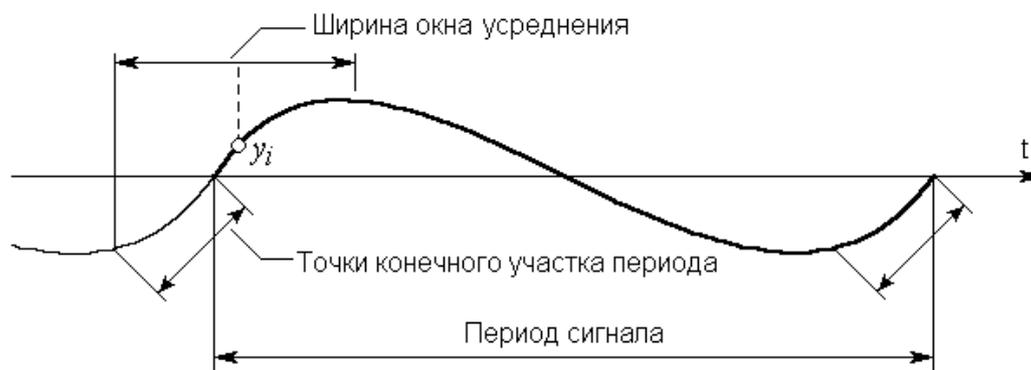


Рисунок 7.12 – Усреднение начальных точек периодического сигнала

Для сравнительной характеристики получим симметричный комплексный и амплитудный спектры

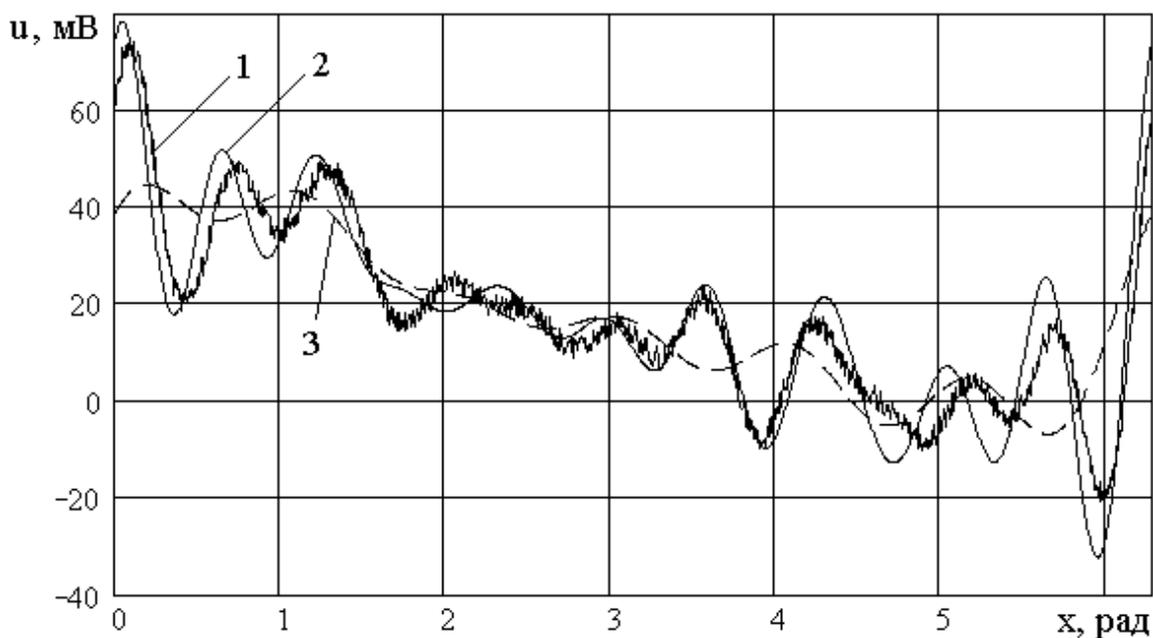
$$c_i = \frac{1}{n} \sum_k y_k e^{-j(2\pi i/n)k}, A_i = |c_i|, \quad (7.8)$$

где  $i, k$  – индексные переменные,  $j$  – комплексный вектор единичной длины,  $A_i$  – амплитуда  $i$ -й гармоники.

На рис. 7.13 представлены результаты обработки сигнала по методу 12-ти и по методу 24-х ординат. Как и следовало ожидать, второй метод обеспечивает большую степень приближения при незначительном увеличении объема вычислительных операций.

Для проверки достоверности полученных спектров и вычисления относительных погрешностей определения амплитуд гармонических составляющих в оболочке Mathcad 2001 pro разработана программа анализа виброакустических сигналов известными методами и методом 24 ординат. С помощью программы обработаны сигналы, оцифрованные АЦП различной разрядности. Для отфильтровывания шумов квантования АЦП (которые видны на графике 1 рис. 7.13) применялось линейное сглаживание сигнала усреднением по 3-м и 5-ти точкам.

С целью обеспечения соблюдения условий теоремы Котельникова перед выборкой 24-х точек (ординат) было выполнено сглаживание сигнала методом скользящего среднего с шириной окна  $N/24$ , где  $N$  – число точек в выборке. При этом спектр анализируемого сигнала ограничен сверху частотой Найквиста, что исключает эффект стробоскопирования.



1 – исходный сигнал; 2 – сигнал, полученный методом 24-х ординат; 3 – сигнал, полученный методом 12-ти ординат

Рисунок 7.13 – Аппроксимация сигнала отображениями, восстановленными по его спектрам

Для получения симметричного комплексного спектра известным методом используем встроенную функцию  $S = CFFT(Y)$ , где  $S = (c_0, c_1, \dots, c_i, \dots, c_{n-1})$  – вектор комплексных коэффициентов ряда Фурье,  $Y = (y_0, y_1, \dots, y_i, \dots, y_{n-1})$  – вектор ординат мгновенных значений анализируемого сигнала.

Рис. 7.14 позволяет сопоставить спектр сигнала, полученный с помощью встроенной функции  $CFFT$  по 672 точкам, со спектрами, построенными с использованием методов 12 и 24 ординат.

Погрешность в определении амплитуд гармоник обусловлена предварительным сглаживанием сигнала. В сравнении с методом 12 ординат метод 24 ординат позволяет в 2 раза расширить анализируемый частотный диапазон сигнала при незначительном увеличении объема вычислительной работы.

#### **7.4 Совершенствование цифрового устройства, реализующего многоканальный контроль геотехнических систем**

Основными информативными параметрами при сейсмической, сейсмоакустической, виброакустической и пьезоэлектрической диагностике являются кинематические и динамические

характеристики упругих и электромагнитных волн: время вступления и скорости волн; амплитуды колебаний без определения частоты (пиковая амплитуда); доминирующие частоты; максимальная амплитуда колебаний на заданной частоте; длительности колебательного процесса и процесса соударения ударника и среды; спектральный состав колебаний, определяемый дискретным набором амплитуд на фиксированных средних или заранее выбранных частотах. В случае параллельного измерения силы удара информативными параметрами могут быть различные соотношения амплитуд и длительностей колебательных процессов [24, 28, 29, 57, 63, 72, 73, 132, 136].

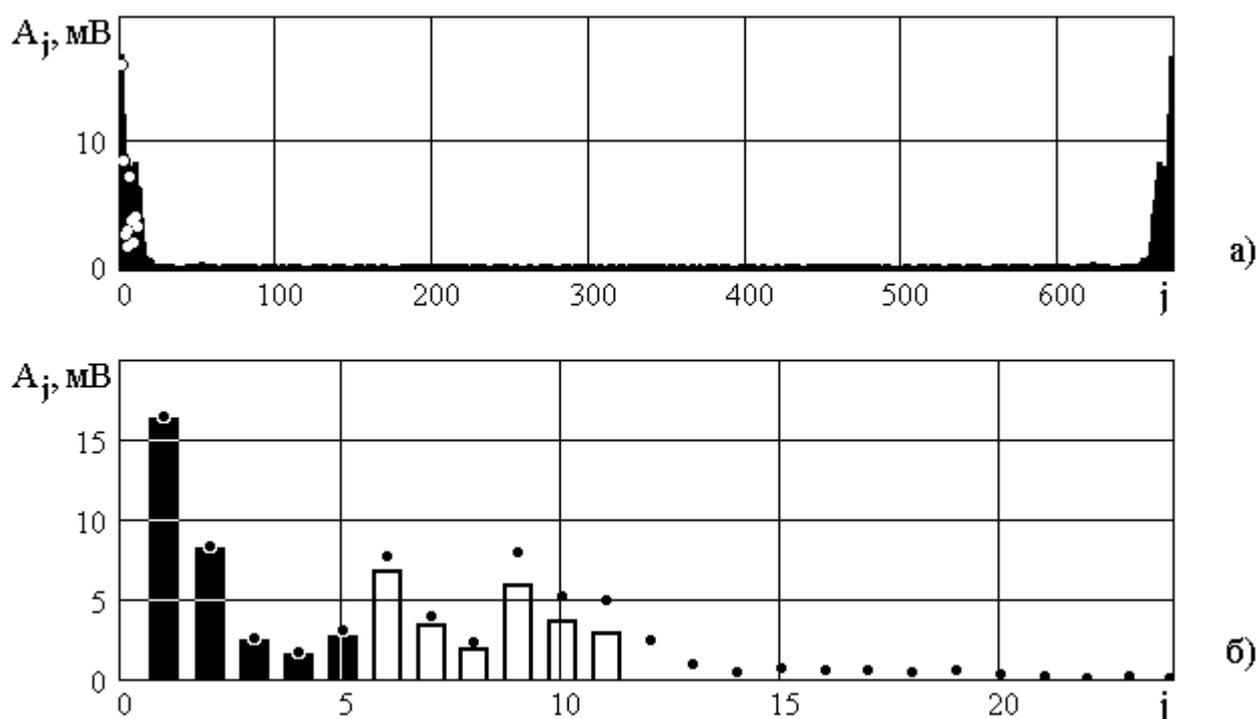


Рисунок 7.14. Спектры сигналов: а) удвоенный симметричный амплитудный спектр; б) низкочастотная часть спектра, полученная известным методом (точки), методом 24-х ординат (столбцы) и методом 12-ти ординат (закрашенные столбцы).

Для приборов оперативного контроля и контроллеров нижнего уровня автоматической системы разработаны методы и алгоритмы цифрового преобразования сигнала из временной области в частотную, обеспечивающие уменьшение размера выходного вектора преобразования по отношению к входному. Компактность вектора коэффициентов такого преобразования упрощает выбор параметров и критериев контроля и оценку исходного сигнала на соответствие этим критериям. Предложенные методы базируются на

автоматическом разбиении исходного апериодического сигнала на мнимые периодические составляющие по алгоритму работы двух пороговых элементов, выходы которых подаются на входы RS-триггера с последующим анализом выделенных сигналов по методу двенадцати ординат [108, 134].

Перечисленные методы обработки сигналов реализует универсальный микропроцессорный прибор (блок компьютерной системы мониторинга), функциональная структура которого представлена на рис. 7.15, а [133]. Данная структура является обобщенной и может быть модифицирована в зависимости от назначения приборов и предъявляемых к нему требований. В частности, опробованы схемы с двумя и восемью входными каналами и разным объемом памяти. Это могут быть 8-канальная сейсмическая, сейсмоакустическая или пьезоэлектрическая цифровые станции, виброакустический прибор с 5- или 7-частотной регистрацией на 256 уровнях, радиоволновой, радиометрический или электрометрический приборы. Возможна параллельная блокировка плат.

Наличие интерфейса связи с компьютером позволяет использовать устройство как составную часть системы геофизического мониторинга либо как контроллер нижнего уровня автоматизированной многоуровневой системы контроля технологических процессов. Вычислительным ядром прибора является однокристалльный микроконтроллер (ОМК) семейства MCS-51/52 фирмы Intel. Выбор данного микроконтроллера основан на таких его преимуществах как развитая архитектура и система команд, высокое быстродействие, наличие внутреннего оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) и перепрограммируемого постоянного запоминающего устройства (ПЗУ), выполняющего функции памяти программ.

Входной сигнал прибора с датчика колебаний поступает на блок перестраиваемых аналоговых фильтров, который может выполнять несколько функций: предварительное усиление сигнала, выравнивание амплитудно-частотной характеристики измерительного тракта, пропускающая или заграждающая фильтрация в одной или нескольких частотных полосах. Блок перестраиваемых фильтров выполнен на одной или нескольких специализированных микросхемах двухканальных многополосных эквалайзеров. Величины сопротивлений в частотоподающих RC-цепочках могут изменяться дискретно с помощью переключателей

или электронных коммутаторов либо плавно – переменными резисторами.

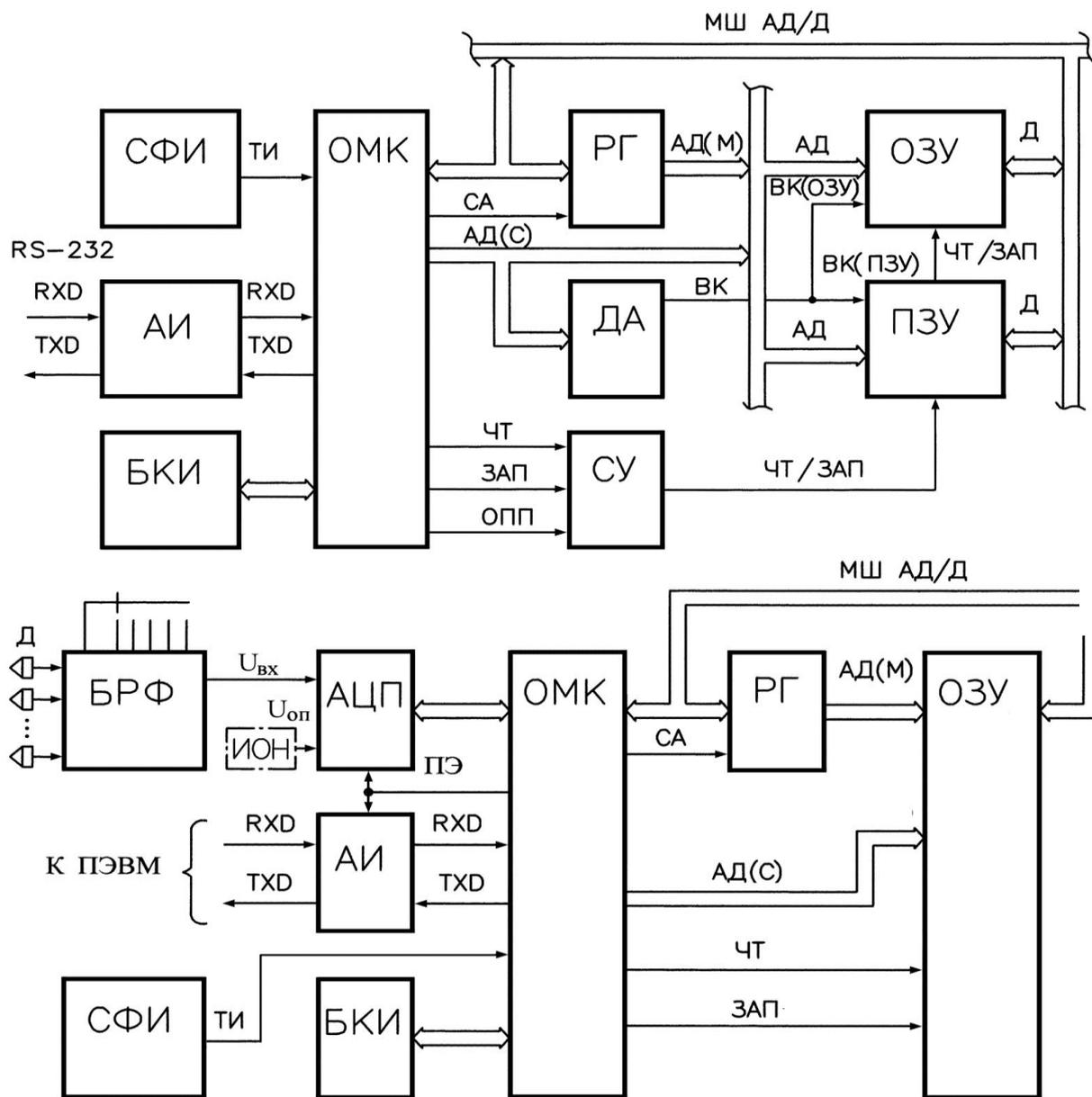


Рисунок 7.15 – Структурные схемы микропроцессорного прибора геофизического контроля (а) и отладочного устройства (б): Д – датчик; БРФ – блок регулируемых фильтров; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ОМК – однокристалльный микроконтроллер; РГ – регистр-фиксатор адреса; ОЗУ – оперативное запоминающее устройство; МШ АД/Д – мультиплексная шина адреса/данных; АД(М) – младший байт адреса; СА – строб адреса; ПЭ – включение пониженного энергопотребления; АД(С) – старший байт адреса; ЧТ/ЗАП – сигнал чтения/записи данных; СФИ – схема формирования тактовых импульсов (ТИ); БКИ – блок клавиатуры и индикации; ВК – сигнал выбора кристалла; АИ – адаптер интерфейса RS-232; ДА – дешифратор адреса; ОПП – сигнал обращения к памяти

Для ввода аналоговых сигналов используется микросхема внешнего микромощного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) с последовательным форматом выдачи данных. В качестве эталона напряжения используется интегральный прецизионный источник опорного напряжения (ИОН). Возможно также использование преобразователя со встроенным ИОН или микроконтроллера со встроенным АЦП. Выбор конкретного схемотехнического решения определяется требуемыми точностью и скоростью преобразования. Применение АЦП с последовательным форматом выдачи позволяет упростить топологию печатной платы прибора, поскольку для обмена данными с управляющим микроконтроллером необходимо только три сигнальных линии при любой разрядности преобразования. Однако, при числе входных аналоговых каналов больше 4 применение последовательного интерфейса для связи с АЦП нецелесообразно, так как время опроса преобразователя возрастает пропорционально числу каналов. Поэтому в 8-канальных приборах используется мультиплексный АЦП с выдачей данных в параллельном коде по стандартному протоколу обмена [133].

Для регистрации осциллограмм сигналов применено внешнее ОЗУ объемом от 2 до 64 Кбайт, подключаемое к микроконтроллеру через мультиплексную шину адреса/данных и шину старшего байта адреса. Младший байт адреса ячейки памяти, к которой обращается микроконтроллер, фиксируется в регистре РГ по сигналу стробирования СА. Использование внешней памяти данных позволяет разделить во времени процессы записи сигнала и его последующей цифровой обработки. При этом возможно применение сложных медленнодействующих алгоритмов фильтрации, так как на обработку сигнала можно выделить 1...3 с. (за одну секунду микроконтроллер с тактовой частотой 24 МГц способен выполнить  $5 \cdot 10^5$  команд однобайтного умножения или  $4 \cdot 10^3$  12-ординатных преобразований Фурье по методу, описанному в [108]). Во внешнем ОЗУ можно также сохранять окончательные результаты измерений в случае, если прибор используется в полевых условиях и передача данных в персональную ЭВМ временно невозможна. Данные сохраняются и при выключенном питании прибора, при этом микросхема статического ОЗУ запитывается от резервного источника. Для фиксации пользовательских настроек микрооперационной системы прибора используется энергонезависимое электрически перепрограммируемое постоянное запоминающее

---

устройство (допускается  $10^6$  циклов перезаписи, что эквивалентно 27 годам ежедневной интенсивной эксплуатации прибора).

Отображение информации осуществляется через блок клавиатуры и индикации (БКИ). Возможно применение 7-, 14- и 16-сегментных цифровых, а также матричных знаковинтезирующих индикаторов. Опробованы схемотехнические решения и разработаны программы драйверов для светодиодных индикаторов KTL, KingBright, жидкокристаллических панелей KTC, Data International, а также других фирм-производителей. В 8-канальной версии прибора предусмотрен текстовый знаковинтезирующий жидкокристаллический дисплей с форматом 2 строки по 16 символов [86].

Связь прибора с персональной ЭВМ осуществляется через СОМ-порт компьютера по протоколу интерфейса RS-232. Для согласования уровней напряжений сигналов приема (RXD) и передачи (TXD) данных служит выполненный на специализированной микросхеме адаптер интерфейса (АИ). В перерывах между сеансами оцифровки сигнала и связи с компьютером блоки АЦП и АИ переводятся в экономичный режим сигналом пониженного энергопотребления (ПЭ). Программное обеспечение интерфейса связи состоит из драйвера универсального асинхронного приемопередатчика и управляющей программы Connect, работающей в среде Windows. Программа имеет удобный графический интерфейс и позволяет выполнять обмен данными в обоих направлениях, настраивать порт, просматривать и редактировать данные. Взаимодействие пользователя с программой осуществляется в диалоговом режиме посредством команд строки меню и кнопок управления. Прием/передача данных из порта возможны как непосредственно в файл, так и через программный буфер. Программой поддерживается формат представления шестнадцатиричных данных Intel-hex.

Отладка программного обеспечения и схемных решений выполнялась в оболочке интегральной инструментальной среды COMPASS/51 IDE с помощью специально разработанного отладочного устройства, рис. 7.16, б. Состав и структура устройства определяется перечнем выполняемых функций, в частности, обязательными элементами являются внешнее ОЗУ и интерфейс связи с компьютером. Разработанное отладочное устройство позволяет эмулировать работу микроконтроллеров семейств MCS-31/51/52/55, отличается простотой и доступностью (стоимость

известных эмуляторов сравнима со стоимостью персонального компьютера средней конфигурации). Отладочное устройство (рис. 7.16) имеет внешние ОЗУ и ПЗУ со взаимно отображающимися адресными пространствами, причем микроконтроллер может выполнять программу как из постоянной памяти (в режиме загрузки кода из ЭВМ), так и из оперативной (в режиме эмуляции). Для формирования обобщенных сигналов чтения и записи служит схема управления (СУ). Так как выбор типа памяти осуществляется дешифратором адреса (ДА) по состоянию одной адресной линии, максимальный объем ОЗУ и ПЗУ составляет по 32 Кбайт, что превышает объем встроенной памяти программ существующих на сегодня модификаций микроконтроллеров эмулируемых семейств.

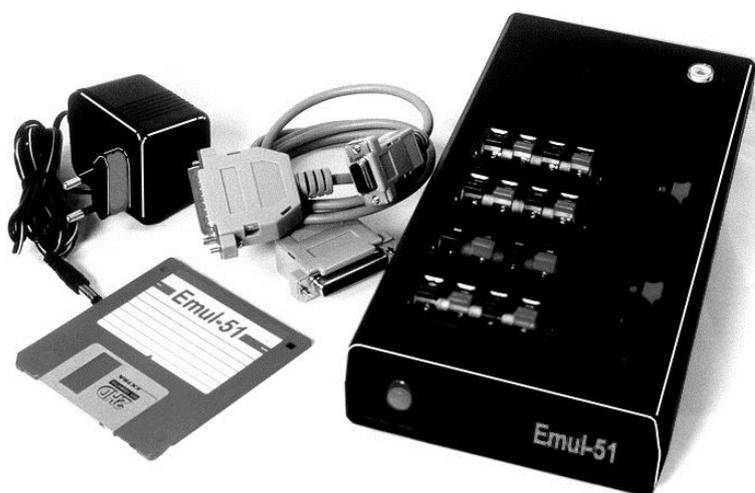
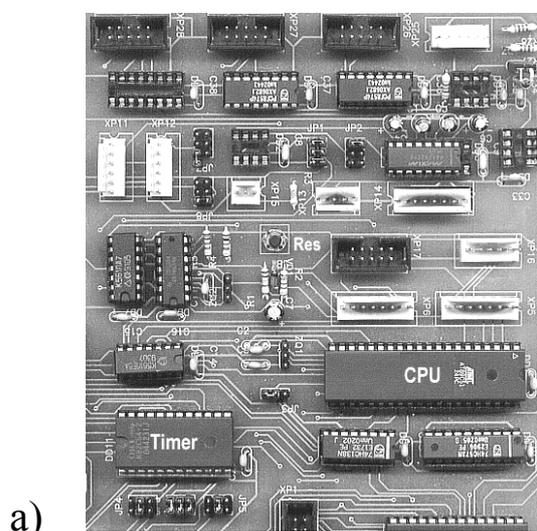


Рисунок 7.16 – Фрагмент печатной платы прибора (а) и отладочное устройство (б) в комплекте с блоком питания и соединительным нуль-модемным кабелем.

---

Отличительной особенностью разработанного отладочного устройства является сохранение системы прерываний микроконтроллера как в режиме загрузки программы, так и в режиме эмуляции. Известно, что при поступлении прерывания с внешнего вывода микроконтроллера от таймеров/счетчиков или от приемопередатчика микроконтроллер начинает выполнять подпрограмму, начиная с адреса, соответствующего источнику прерывания. Адреса векторов прерываний (03h, 0Bh, 13h, 1Bh, 23h) заданы аппаратно и не могут быть изменены. Эти адреса приходятся на область ПЗУ эмулятора. Так как адресные пространства постоянной и оперативной памяти взаимно отображаются, но не пересекаются, то в режиме эмуляции, когда выполняется программа из ОЗУ, необходимо при поступлении прерывания обеспечить корректный возврат из области постоянной памяти в область оперативной. Для этого в ячейки памяти ПЗУ с адресами векторов прерываний записаны коды команд безусловного перехода на отображаемые ячейки оперативной памяти. На время загрузки программы из компьютера в соответствующие ячейки ОЗУ заносятся временные вектора прерываний, которые по окончании процесса загрузки заменяются пользовательскими данными.

Компоновка элементов и трассировка печатных плат модулей приборов и отладочного устройства выполнена в системе автоматизированного проектирования P-CAD 2001 ACCEL Technologies. Программирование приборов осуществляется программатором «Турбо-6». Разработанное отладочное устройство применяется также в учебном процессе Национального горного университета для подготовки студентов по дисциплине «Микроконтроллеры».

## **7.5 Выводы по разделу**

Проведена натурная апробация предложенных методов и средств автоматизации виброакустического контроля системы «крепь-породный массив» при проведении и поддержании капитальных и подготовительных выработок шахт «Днепровская», ПО «Павлоградуголь», «Центральная», ПО «Стахановуголь», гипсовой шахты Артемовского алебастрового комбината, рудников № 1 и № 2 ГГХП «Полиминерал», а также Лоцманского железнодорожного тоннеля и Днепропетровского метрополитена.

Рассмотрены методические особенности контроля, дополняющие «Руководство по геофизической диагностике системы крепь-породный массив» вертикальных стволов» [98].

Выполнен анализ результатов исследований и предложены различные варианты обработки технологической информации и акустических сигналов при обнаружении скрытых заколов и отслоений кровли, картировании пустот, дана оценка достоверности полученных результатов.

Проведены испытания старогодной тубинговой крепи, которая ранее находилась в эксплуатации, и определены тубинги, пригодные для повторной эксплуатации на новых участках.

На основе виброакустических исследований изучен процесс образования пустот вокруг тоннельной обделки Лоцманского железнодорожного тоннеля Приднепровской железной дороги и определена их локализация, а на основе комплекса визуального обследования, бурения скважин и многовекторного автоматизированного виброакустического контроля дана оценка его состояния.

На основе результатов автоматизированного виброакустического контроля тоннельной обделки совместно сотрудниками ДИИТа, ИГТМ, НГУ и НТЦ «Подземиндустрия» подготовлены для «Гипротранса» рекомендации по проведению ремонтно-восстановительных работ на Лоцманском железнодорожном тоннеле.

Разработанные средства и методы автоматизации контроля позволили повысить надежность обнаружения скрытых заколов и отслоений кровли, ускорить операции по ее оборке, улучшить качество крепления за счет рациональной забутовки, а в целом – повысить темпы проведения горных выработок, снизить долю ручного труда и затраты на их поддержание.

Разработана вычислительная схема определения гармонического состава механических и электрических сигналов по методу 24-х ординат, позволяющая обеспечить контроль технологических параметров.

---

## 8 АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ РЕШЕНИИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

---

### 8.1 Особенности крепления и поддержания подготовительных выработок в сложных горно-геологических условиях глубоких угольных шахт

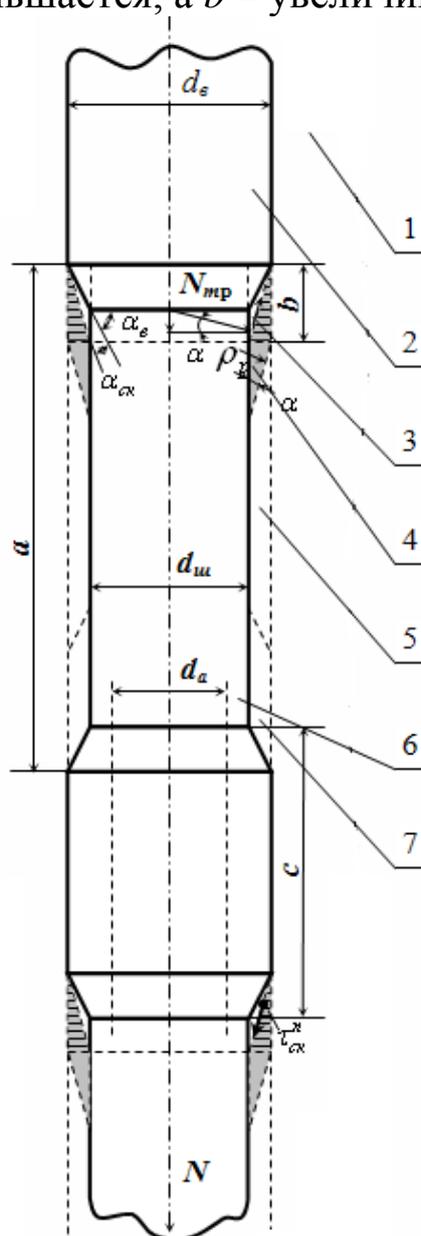
На больших глубинах отработки возможности арочной крепи подготовительных выработок оказались практически исчерпаны как по обеспечению устойчивости, так и податливости замков, поэтому естественным направлением ее усиления является дополнительная установка анкеров с высокой несущей способностью. Такими анкерами являются сталеполимерные, которые устанавливаются в прочных горных породах [15, 65].

В слабых породах в результате разрушения контакта в системе «анкер-смола-порода» сталеполимерный анкер смещается в шпуре, сохраняя при этом не более 10 % своей первоначальной несущей способности за счет сил трения между фрагментами разрушенной породы и полимерным слоем [120]. В то же время в Донецком бассейне большинство шахт отрабатывает угольные пласты во вмещающих породах средней и слабой прочности. Кроме того, на больших глубинах при проведении подготовительных выработок буровзрывным способом в прочных песчаниках часто происходят выбросы пород, поэтому выработки проводят в неустойчивых алевролитах и аргиллитах с помощью комбайнов.

В этой связи повысить несущую способность рамно-анкерного крепления массива горных пород можно только увеличением количества анкеров или повышением нагрузки на каждый анкер за счет увеличения диаметра шпура, что ведет к резкому повышению расхода дорогостоящих материалов. При этом простое увеличение диаметра шпура недостаточно эффективно, так как в слабых породах сильно неоднородные и ослабленные стенки шпура даже большого диаметра легко разрушаются.

В последние годы разработаны и внедряются в производство способы повышения прочности закрепления сталеполимерных анкеров в слабых породах и буровые ставы для их реализации, предусматривающие создание локальных зон сжатия при малых перемещениях анкера и повышение за счет этого несущей способности рамно-анкерной системы. Размер указанных зон

значительно больше максимального диаметра анкера вместе с полимером, поэтому и разрушение породы от сдвига происходит на значительно большей поверхности, окружающей анкер, а следовательно, такая система обладает более высокой несущей способностью, рис. 8.1 [87-89]. Полимерные выступы расклинивают шпур на величину  $d_в-d_{ш}$ . За счет сил трения на выступах ( $d_в$ ) и участках шпура ( $d_{ш}$ ) поддерживается высокая (до 90 % от исходной) несущая способность анкера в режиме податливости. При сдвигении анкера величина  $a$  уменьшается, а  $b$  – увеличивается.



1 – массив; 2 – полимерный выступ; 3 – конус сколотой породы; 4 – минимальный объем сжатой выступом породы; 5 – опорный породный слой; 6 – слой полимерного закрепителя; 7 – зона разрыхления

Рисунок 8.1 – Схема работы сталеполимерного анкера с выступами

---

Недостаток такого анкера заключается в том, что в его работе не учитывается послойная прочность пород, которые пересекает анкер. Кроме того, для поддержания режима податливости полимерный выступ должен быть прочнее породы. При определенных значениях напряжений ослабленные породные слои, подпирающие полимерный выступ, срезаются по цилиндрической поверхности. Это происходит тогда, когда срезающие напряжения на этих участках достигают предела прочности пород. С этого момента несущая способность анкера падает и поддерживается только за счет сил трения по поверхности среза. Таким образом, анкер частично теряет свои преимущества, так как значительная его часть работает в условиях малого диаметра шпура, а прочные полимерные выступы становятся режущим инструментом.

Сталеполимерные анкеры обеспечивают устойчивость выработки только в том случае, если работы по ее проведению и креплению ведутся безостановочно, а ведь на бурение только одного выступа требуется около двух минут (общее число их может достигать десятка). Бурение выступов осуществляется за счет снижения скорости подачи бурового става и повышения скорости вращения. При этом снижается скорость проходки выработки и увеличивается расслоение пород кровли.

Необходимо особо подчеркнуть, что горные породы как объект динамического воздействия – это изначально неоднородная среда как по структуре, текстуре, составу, так и физико-механическим свойствам. Степень неоднородности разделяют на четыре группы: 1) неоднородности крупного масштаба, включающие фациальную изменчивость, тектонические разрывы, зоны выветривания и разгрузки, техногенную неоднородность; 2) неоднородности структуры и состава пород в пределах отдельной пачки, слоя, включая трещиноватость, наличие мелких тектонических дислокаций; 3) неоднородность состава пород в пределах элементарного объема (образца), различие в химическом и минеральном составе, форме и размерах зерен, микротрещин; 4) неоднородности реальных кристаллов, дефектность кристаллической решетки, дислокации [29].

Фрактальные (клеточные) размерности горных пород и породных массивов изменяются в широких пределах и имеют весьма высокие значения как при площадных (1,5-1,9), так и при объемных измерениях размерности поверхности пор методами молекулярной

адсорбции или электронной эмиссии (2,6-2,9), что подтверждает как их высокую неоднородность, так и пористость [16, 113]. Фрактальность среды, в особенности изначально структурированной, имеющей свою кристаллическую структуру, пористость, микрослоистость, микротрещиноватость и так далее и подверженной динамическим воздействиям, играет весьма существенную роль в механике накопления повреждений, определяет эволюцию развития структуры дефектов различного масштабного уровня и ее разрушение [16, 34, 62].

Эти обстоятельства требуют исходной эффективной оценки как статического состояния подготовительной выработки (геотехнической системы «горный технический объект – породный массив»), так и динамического состояния разрушаемого породного массива, которую можно выполнить на основе геологоразведочных данных только методами математического моделирования с последующей корректировкой результатов уже во время эксплуатации объекта методами визуального, оперативного или непрерывного контроля [13, 29, 52, 56, 70, 80, 82, 83, 98, 100, 107, 123].

## **8.2 Моделирование процесса хаотизации при бурении шпуров для установки анкеров с целью повышения их устойчивости на основе упрощенной модели трехплечевых гравитационных маятников**

Длительное время в науке существовало убеждение, что вокруг горных выработок образуются зоны опорного давления, обусловленные только давлением вышележащих пород, на которые частично накладывается влияние тектонических напряжений. Однако комплексные геофизические исследования протяженных горных выработок, тоннелей показали, что формирование пустот, зон трещиноватости и повышенных напряжений подчиняется и другим неизвестным ранее закономерностям, которые определяются не только горно-геологическими условиями, но и горнотехническими условиями их эксплуатации [84, 85, 130].

На малых глубинах разработки процесс разрушения породного массива имеет причинно-следственный характер. С ростом глубины, когда величины напряжений становятся соизмеримыми с прочностью пород, разрушение усиливается, лавинообразно растет количество

---

очагов разрушения различных типов, природа разрушения также становится более многообразной: разрушение хрупкое, пластическое, сколы на дислокациях, трещинах и микротрещинах, с накоплением повреждений, воды и газа. При этом ранее принятое модельное представление не отражает в полной мере особенностей поведения подработанной толщи, в особенности в условиях динамического воздействия на массив, и оценка состояния таких объектов становится чрезвычайно сложной. Немаловажную роль в распределении свойств и состояния породного массива играют динамические синергетические и хаотические процессы, а именно, технологические особенности проведения и поддержания выработок: способы и средства проходки; вид и тип крепи, цикличность и повторяемость элементов крепи; условия и средства забутовки пространства, а также гидрогеологические условия. Однако до сих пор не раскрыт механизм происходящих процессов, суть явления накопления дислокаций и поэтапного разрушения породного массива. Самые прочные крепи разрушаются, породы и грунты деформируются, а стоимость добычи подземных ископаемых в связи с увеличением глубины разработки и усложнением горно-геологических условий постоянно увеличивается [16, 50, 57, 111,110,124, 129, 130].

В связи с этим применение рамных податливых крепей на больших глубинах разработки угольных месторождений для обеспечения устойчивости протяженных подготовительных выработок, возводимых без плотной забутовки закрепного пространства, которую качественно выполнить практически невозможно, оказалось малоэффективным. При креплении рамно-анкерной крепью в массиве кровли выработки с помощью сталеполлимерных анкеров создается породный блок, в котором максимально сохраняется состояние изначально нетронутого массива и достигается высокая прочность блока благодаря физическому объединению высоких прочностей горной породы на всестороннее сжатие и стальных штанг на растяжение [15].

Этот породный блок частично разрушается со стороны выработки, происходит автоматическая забутовка закрепного пространства, подпор и блокирование расслоения нарушенных пород, благодаря чему создается конструкция высокой устойчивости. Полному обрушению пород кровли препятствует металлическая сетка, которая при монтаже заводится за специализированный

профиль рамной крепи. Сталеполимерные анкеры укомплектованы опорными шайбами, которые гайками плотно с усилием около 50 кН прижимают к поверхности выработки. Длина рабочей части анкера принята типовой – 2250 мм и составляет половину ширины выработки [120].

Для повышения несущей способности крепи в условиях пород кровли со слабой и средней прочностью разработан способ закрепления анкера, включающий бурение шпура с пустотами [89], отличающийся тем, что пустота, которая нарезается, выполнена по винтовой линии в виде паза с заданными размерами глубины, ширины и расстояния между пазами винтовой линии вдоль всей длины шпура, при этом глубину паза принимают равной 0,05-0,10 диаметра шпура, а ширину паза определяют из соотношения:

$$C \geq \frac{P}{\tau_{cp}^{n3} \pi d_{ш}}, \quad (8.1)$$

где  $C$  – ширина паза, мм;  $P$  – усилие на растяжение, действующее на анкер, кН;  $\tau_{cp}^{n3}$  – предельная прочность полимерного слоя (заполнителя) на срез, МПа;  $d_{ш}$  – диаметр шпура, мм. Расстояние между пазами винтовой линии определяется по формуле:

$$S = \frac{P}{k \tau_{cp}^n \pi (d_{ш} + 2h)} + C + l, \quad (8.2)$$

где  $S$  – расстояние между пазами винтовой линии, мм;  $k$  – коэффициент заходки винтовой линии, который принимается равным 1, 2, 3 в зависимости от типа бурового става и прочности пород;  $\tau_{cp}^n$  – предельная прочность породы на срез, МПа;  $h$  – глубина нарезаемого паза, которая принимается равной  $(0,05 - 0,10) d_{ш}$ ;  $l$  – предельная величина смещения анкера при нагружении, мм, значение которой определяется технологией. Способ за пунктом 1 отличается тем, что нарезаемый паз выполнено двухзаходным. Способ за пунктами 1, 2 отличается тем, что нарезаемый паз выполнено трехзаходным [89]. Этот вариант способа реализован практически за счет использования явления динамического хаоса.

---

Выявить и описать особенности моделирования динамических процессов в динамической системе «горный технический объект – породный массив», смоделировать хаотические и синергетические процессы в ней при допустимой погрешности итераций, изменении порядка вычислений величин угловых ускорений эксцентрически смещенных масс внутри одной итерации позволили методы аналитической механики, раздел 2 [50, 57, 85, 129].

В качестве исходной математической модели выбрана система трех связанных гравитационных маятников (см. подраздел 2.2). Следует обратить особое внимание, что для вращающегося трехзвенного бурового става гравитационные силы значительно меньше (в 18-20 раз) центробежных сил, поэтому в данном случае гравитационными силами можно пренебречь. В гравитационном маятнике звено, достигнув максимального отклонения, приобретает максимальную потенциальную энергию и нулевую кинетическую. Элементы бурового става, наоборот, при соударении со стенкой шпура теряют потенциальную энергию и приобретают максимальную кинетическую с импульсом в противоположном направлении (к оси вращения в той же виртуальной плоскости), далее идет рост потенциальной энергии и так далее [85].

Говорить о полной адекватности математической модели из трех гравитационных маятников механической системе бурового става с пневмоприводной установкой с эксцентрически неуравновешенными вращающимися относительно нефиксированных центров массами нет оснований. Результаты моделирования часто критически чувствительны к незначительным изменениям параметров систем, тем более при такой сложной физической аналогии. Однако реальные массы и размеры штанг, наличие аналогичных трехплечевых систем, оказалось, позволяют довольно просто управлять хаотичностью вибраций буровой установки, изменяя и подбирая параметры математической модели, рис. 8.2 [85].

Апробация выполнена на шахте имени А.Ф. Засядько, глубина отработки угольного пласта 1380 м. На шахте используются анкероустановщики (анкерные буровые колонки) импортного производства, которые предназначены для безударного вращательного бурения пород кровли и установки анкерной крепи [120]. Они имеют пневматические приводы, работающие на сжатом воздухе и телескопические трехсекционные штанги.

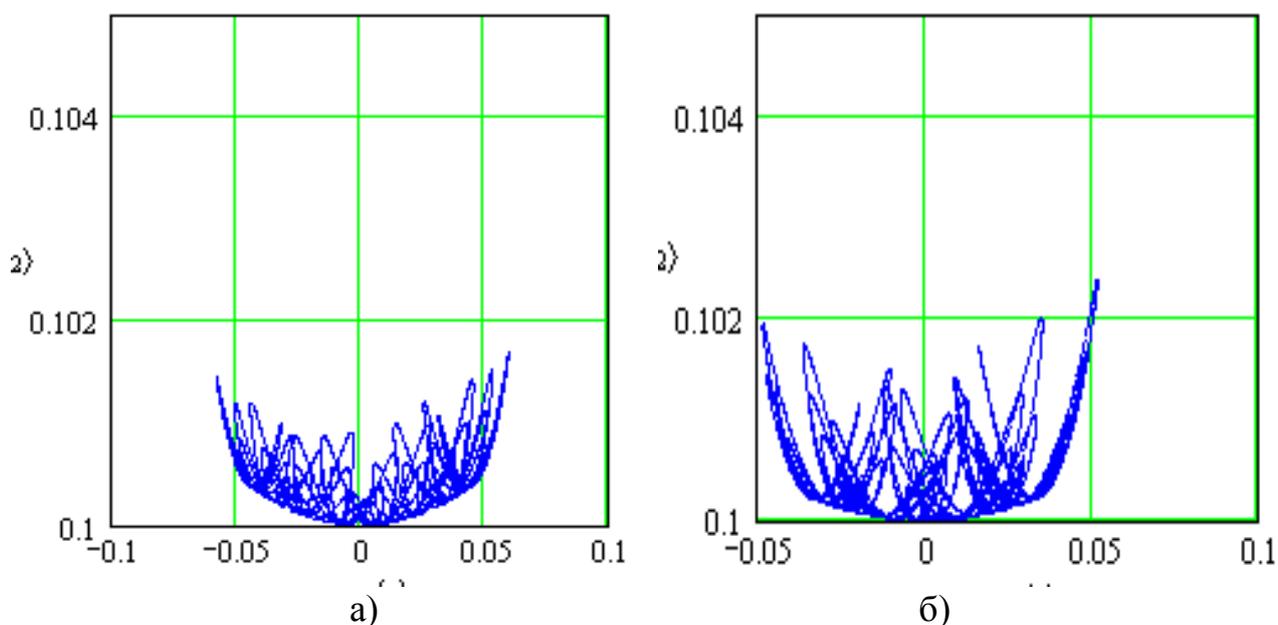


Рисунок 8.2 – Колебания буровой коронки в плоскости  $x$ - $y$ : а –  $\alpha_1 = \pi/180 = 1^\circ$ ,  $\alpha_2 = -\pi/60 = -3^\circ$ ,  $\alpha_3 = \pi/30 = 6^\circ$ ,  $r_1 = 2,5$ ,  $r_2 = 0,1$ ,  $r_3 = 0,1$ ,  $m_1 = 30$ ,  $m_2 = 0,5$ ,  $m_3 = 0,5$ ; б –  $\alpha_1 = \pi/240 = 0,75^\circ$ ,  $\alpha_2 = -\pi/60 = -3^\circ$ ,  $\alpha_3 = -\pi/20 = -9^\circ$ ,  $r_1 = 2,5$ ,  $r_2 = 0,1$ ;  $r_3 = 0,1$ ,  $m_1 = 30$ ,  $m_2 = 0,5$ ,  $m_3 = 0,5$ .

Анкерная буровая колонка Super Turbo Bolter (Minova International Ltd, Англия) имеет: частоту вращения – 870 об/мин при рабочем давлении 4,8 бар, 900 при рабочем давлении 5,8 бар; усилие, кН – 1,4; 1,2; 1,0 (3 ступени); высоту раздвижки, м – 3,2 – 3,6. Анкерная буровая колонка Gopher MGS/350/3/LP (KRONcis GmbH, Германия) имеет: частоту вращения, об/мин – 850 при рабочем давлении 5,5 бар, 875 при рабочем давлении 6,2 бар; усилие, кН – 9,0; 6,9; 5,1 (3 ступени); высоту раздвижки, м – 3,2 – 3,6. Анкерная буровая колонка BAS 3,0/600 имеет следующие характеристики: частоту вращения – 850 об/мин при рабочем давлении 4,8 бар, 900 при рабочем давлении 5,8 бар; усилие – 0,45, 0,6, 0,9, 1,14 кН (4 ступени); высоту раздвижки – 2,2-4,5 м. Таким образом, все установки имеют частоту вращения не ниже 850 об/мин, поэтому допущение о пренебрежении гравитационными силами по сравнению с центробежными (центростремительными) в первом приближении можно считать справедливым.

При одних и тех же силовых воздействиях в более слабых породах скорость бурения шпура увеличивается. Если создать в зоне бурения хаотический режим работы, то в ослабленных породах повышается не только скорость бурения, но и избирательно

увеличивается диаметр шпура, а это автоматически ведет к повышению устойчивости анкера в этой зоне.

О наличии хаотической динамики свидетельствуют образцы анкеров, извлеченных из массива горных пород для осмотра и контроля после их установки и отработки заранее заданного времени, рис. 8.3. На застывшем полимерном слое видно, как в слабых горных породах увеличивается шаг бурения при вращении бурового става. Кроме того, стальной анкер совместно с полимерным слоем имеет вид винта с тремя винтовыми заходами, расстояния между которыми изменяются по длине от двух до шести сантиметров в зависимости от прочности пород. Изменяется и высота выступов. Никаких специальных мер для создания такой конфигурации, кроме выбора размеров, смещений и масс вибрирующих элементов, не принималось. А этот факт соответствует работе американских математиков Ли и Йорке [156], которые опубликовали широко известную статью «Период три означает хаос», и теореме академика НАН Украины А.Н. Шарковского, следуя из которой цикл периода три является частным случаем хаотического движения [61].



Рисунок 8.3 – Фрагмент сталеполимерного анкера после его извлечения из шпура

Для дополнительного подтверждения тезиса о хаотичности движения исследуемой буровой системы выполним вычисление

старшего показателя Ляпунова  $\Lambda$  при различных значениях ее параметров [85]. Показатель  $\Lambda$  определяем в соответствии с алгоритмом Бенеттина [61], состоящим в выполнении следующих действий, рис. 8.4, а. Задавшись некоторой исходной точкой фазового пространства  $x_0$ , рассматриваем исходящую из нее траекторию и возмущенную траекторию, стартующую из точки, удаленной от  $x_0$  на расстояние нормы вектора возмущения  $\xi$ :  $x_0 + \tilde{x}_0$ , где  $\|\tilde{x}_0\| = \xi$  (см. рис. 8.4). С помощью программной модели определяем вектора состояния системы и их возмущения через периоды времени  $T$ . Отношение  $\frac{\|\tilde{x}_k\|}{\xi}$  характеризует изменение нормы вектора возмущения за время  $T$  на  $k$ -ом шаге. При прохождении точки бифуркации указанное отношение значительно возрастает, т.к. возмущенная траектория качественно отклоняется от исходной.

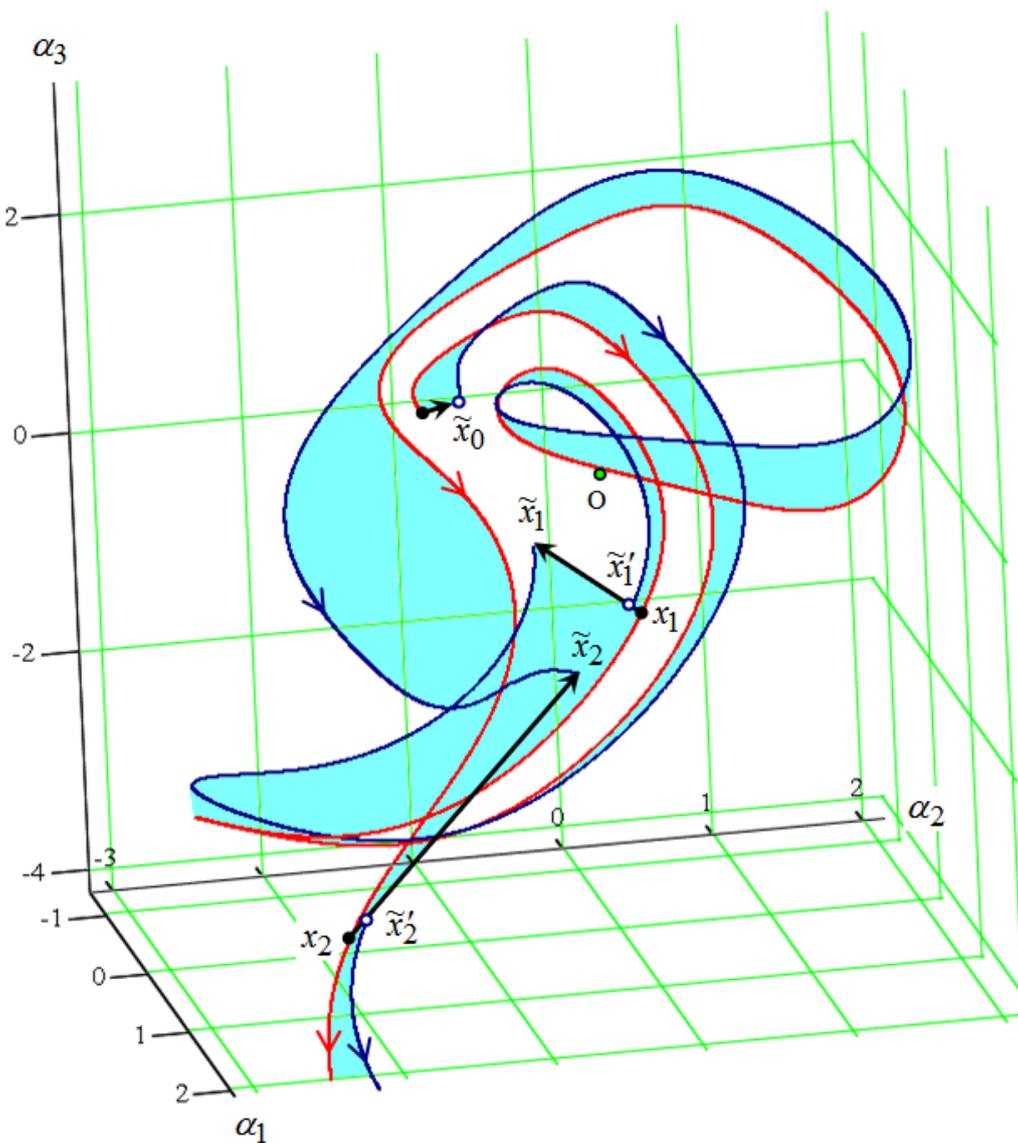
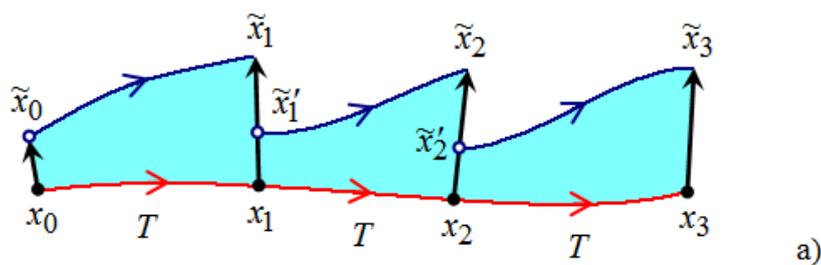
Старший показатель Ляпунова  $\Lambda$  определяется как [61]

$$\Lambda \cong \frac{1}{MT} \ln P = \frac{1}{MT} \sum_{k=1}^M \ln \frac{\|\tilde{x}_k\|}{\xi}, \quad (8.3)$$

где  $M$  - число интервалов,  $P = \prod_{k=1}^M \frac{\|\tilde{x}_k\|}{\xi}$  - фактор изменения амплитуды возмущения за  $M$  интервалов.

Вычисление значений старшего показателя Ляпунова выполнялось при следующих неизменных параметрах моделирования: число точек интегрирования в пределах одного интервала  $n=5000$ , число интервалов  $M=50$  (таким образом, общее число точек траектории  $n \cdot M = 2,5 \cdot 10^5$ ), шаг интегрирования по времени  $h=0,0005$ с (следовательно, длительность интервала, т.е. период  $T = nh = 2,5$ с, время моделирования  $t = nMh = 125$ с), допустимая максимальная погрешность итераций  $\varepsilon = 0,001$  о. е.

За исключением конкретно необходимых случаев, во всех моделях использованы маятники с одинаковыми массами грузов ( $m_1 = m_2 = m_3 = 1$ кг) и равными длинами плеч ( $l_1 = l_2 = l_3 = 1$ о. е.); вектор возмущений опирается на начало координат и проведен к точке, равноудаленной по всем осям на 0,01 в соответствующих единицах измерения [85].



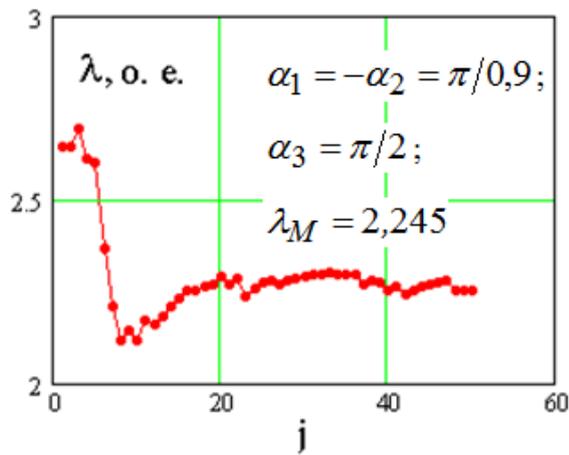
б)

Рисунок 8.4 – Иллюстрация определения старшего показателя Ляпунова по алгоритму Бенеттина в общем случае (а) и для исследуемой системы (б).

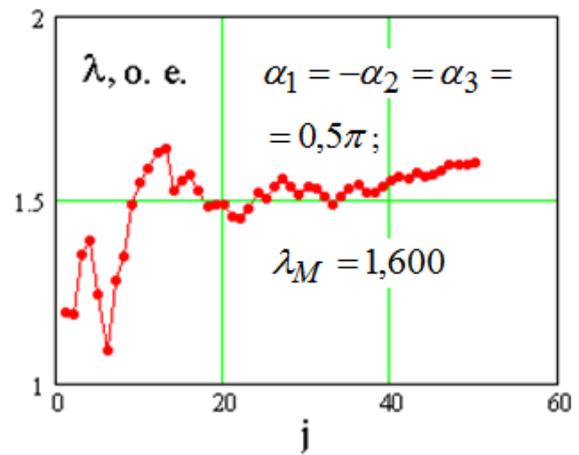
Для проверки достоверности вычислений выполнено моделирование системы при начальных условиях, обеспечивающих детерминированное упорядоченное движение системы. В частности, в случае одинакового по величине незначительного (близкого к нулю) отклонения от вертикали равноразмерных маятников, начинающих движение из состояния покоя, получаем гармонические

колебания системы. Центры масс маятников движутся по коротким дугам, близким к хордам. Аналогично, в случае задания одинаковых начальных угловых скоростей вращения равноразмерных маятников, начиная от положения равновесия, получаем упорядоченное вращательное движение, при котором в течение всего достаточно длительного интервала моделирования центры масс маятников описывают траектории, близкие к концентрическим окружностям с центром в точке подвеса первого маятника. В обоих случаях старший показатель Ляпунова должен быть близким к нулю. Как показало моделирование, для указанных начальных условий имеем  $\Lambda = 0,018$  при гармонических колебаниях и  $\Lambda = 0,088$  при вращательном движении (рис. 8.5, г, д), что дополнительно подтверждает правильность программы. При иных начальных условиях та же программная модель в результате вычислений дает значения старшего показателя Ляпунова, большие единицы, что является критерием хаотического движения исследуемой системы, рис. 8.5, а, б, в [85].

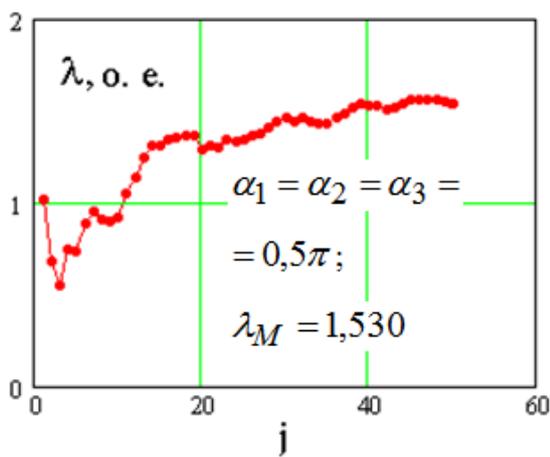
Размерность фазового пространства исследуемой системы определяется количеством координатных осей, фиксация значений по которым позволяет однозначно определить ее текущее положение в указанном пространстве, т. е. задать текущее состояние системы (в том числе – энергетическое). Эти координаты определяют не параметры системы (т. е. не являются параметрическими коэффициентами), а лишь ее положение. Для гамильтоновой консервативной системы размерность фазового пространства четная; состояние системы задается набором динамических переменных: обобщенными координатами и импульсами. В нашем случае таких переменных шесть: это углы  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$ , определяющие потенциальную энергию системы, и угловые скорости  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  и  $\omega_3$ , определяющие кинетическую энергию (т. к. в процессе функционирования исследуемой системы массы грузов и длины плеч маятников неизменны, то угловые скорости определяют значения импульсов и могут быть использованы в качестве динамических координат). Количество пар координат и импульсов, то есть величину, вдвое меньшую размерности фазового пространства, называют числом степеней свободы [61]. Для системы трех гравитационных маятников число степеней свободы равно трем.



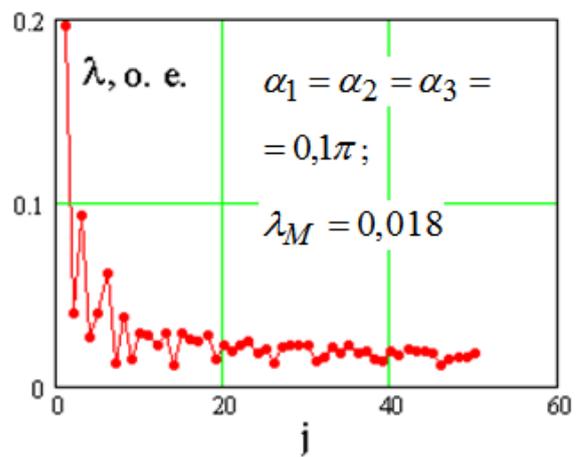
а)



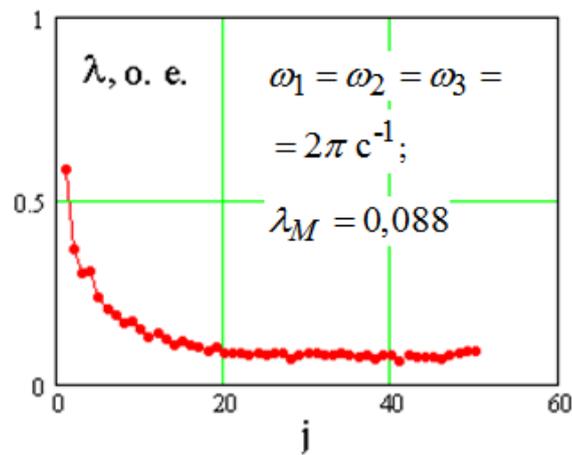
б)



в)



г)



д)

Рисунок 8.5 – Влияние начальных условий на хаотичность поведения системы по Ляпунову: а – г – уменьшение начальных углов и исключение чередования их знаков упорядочивает функционирование системы; д – упорядочивание вращением маятников (на рисунках приведены начальные значения углов и угловых скоростей и конечные значения старшего показателя Ляпунова)

### 8.3 Оценка влияния формы стенок шпура на работоспособность сталеполимерного анкера методом конечных элементов

Для прогноза и оценки режима разрушения горных пород вблизи подготовительной выработки и, соответственно, оценки ее устойчивости информативными показателями являются [15]:

$$Q^* = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\gamma H}, \quad (4.4)$$

$$P^* = \frac{\sigma_3}{\gamma H}, \quad (4.5)$$

где  $Q$  – отношение разности наибольших ( $\sigma_1$ ) и наименьших ( $\sigma_3$ ) главных напряжений к напряжениям от веса вышележащей толщи пород ( $\gamma H$ ) характеризует возможность возникновения разрушения;  $P$  – отношение наименьших ( $\sigma_3$ ) главных напряжений к  $\gamma H$  характеризует возможный режим разрушения.

Чем меньше разница компонент главных напряжений, тем менее вероятно разрушение пород. В непосредственной близости от контура выработки минимальная компонента напряжений становится близкой к нулевому значению, поэтому происходит расслоение пород. В плоской постановке рассматриваются две компоненты напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ .

Оценку статического напряженно-деформированного состояния массива горных пород кровли подготовительной выработки при анкерном креплении проведено с помощью математического моделирования методом конечных элементов на вычислительном комплексе «ГЕО-РС (v.5.0.)», разработанном в ИГТМ НАН Украины на основе метода конечных элементов с учетом исследований [112]. Верификация выполнена авторами комплекса в работах [102, 103], погрешность приближенных математических вычислений не превышает 10 % и связана преимущественно с детальностью разбиения на элементы. Дополнительно проведено сопоставление аналогичных исследований с результатами работы [15], которые подтвердили хорошую сходимость. Кроме того, данные исследования выполнены при разбиении участков породного массива на более мелкие элементы.

Для учета упругопластических свойств горных пород в программе совмещены процедуры метода конечных элементов

(МКЭ) и метода начальных напряжений (МНН). Определение предельных состояний породного массива дает возможность максимально приблизить математическую модель разрушения неупругой среды к реальному поведению горных пород под действием нагрузки.

Предельные напряжения в области растяжения в программе «Геомеханика» ограничиваются пределом прочности на растяжение, при этом они автоматически принимаются равными  $C/5$  для элементов, не выходящих в пластику, и равными нулю для элементов, выходящих в пластику на предыдущих циклах итерации. В области сжатия предельные напряжения ограничиваются пределом прочности на сжатие, который также автоматически определяется по критерию Кулона, исходя из послойно заданных физико-механических свойств породного массива [112]:

$$\sigma_1^{np} = 2 C \operatorname{ctg} \left( 45 - \frac{\varphi}{2} \right) + \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_2, \quad (8.6)$$

где  $C$  и  $\varphi$  - сцепление и угол внутреннего трения.

Однако наибольший интерес в плане исследования процессов разрушения породного массива вокруг геомеханических объектов представляет упругопластическая модель среды с разупрочнением за пределом прочности. Для ее реализации в программе введено понятие остаточной прочности  $\sigma_1^{ост}$ . Формально единственным отличием от модели с идеальной пластичностью является определение  $\sigma_1$  за пределом прочности [112]:

$$\sigma_1 = \sigma_1^{ост} + \frac{\sigma_1^{np} - \sigma_1^{ост}}{2 \varepsilon_1^y} (3 \varepsilon_1^y - \varepsilon_1), \quad (8.7)$$

где  $\sigma_1^{np}$  – предельное максимальное напряжение (предельная прочность);  $\varepsilon_1^y$  – предельная упругая деформация. За предельная прочность определяется при  $\varepsilon_1^y \leq \varepsilon_1 \leq 3 \varepsilon_1^y$  формулой (8.7), а остаточная прочность  $\sigma_1^{ост} = \sigma_1 / 3$ . Управляющим параметром является деформация. Устойчивые упругопластические решения с учетом остаточной прочности обычно достигаются за 10-15 циклов итерации. Число циклов итерации указывается в выводимой информации. Если итерационный процесс не сошелся за 500 циклов, то надежды на

сходимость в дальнейшем нет, программа автоматически прекращает работу.

Необходимо подчеркнуть, что при проведении каждой последующей итерации программа автоматически вычисляет и отслеживает состояние каждого элемента, автоматически производит необходимые замены даже при разрыве одной связи между узлами. Это является существенным преимуществом, так как дает широкие возможности для определения наиболее вероятных областей зарождения и прогноза распространения зон разрушения в массиве, позволяет детально исследовать сложные геомеханические процессы.

Методика оценки состояния массива включает: 1) разработку расчетной схемы (рис. 8.6); 2) ввод реальных данных по структуре горных пород, физико-механическим свойствам (табл. 8.1), элементах технологии ведения горных работ; 3) оценку напряжений, деформаций и смещений, определение и анализ разрушенных зон, в которых наиболее интенсивно происходят деформационные процессы.

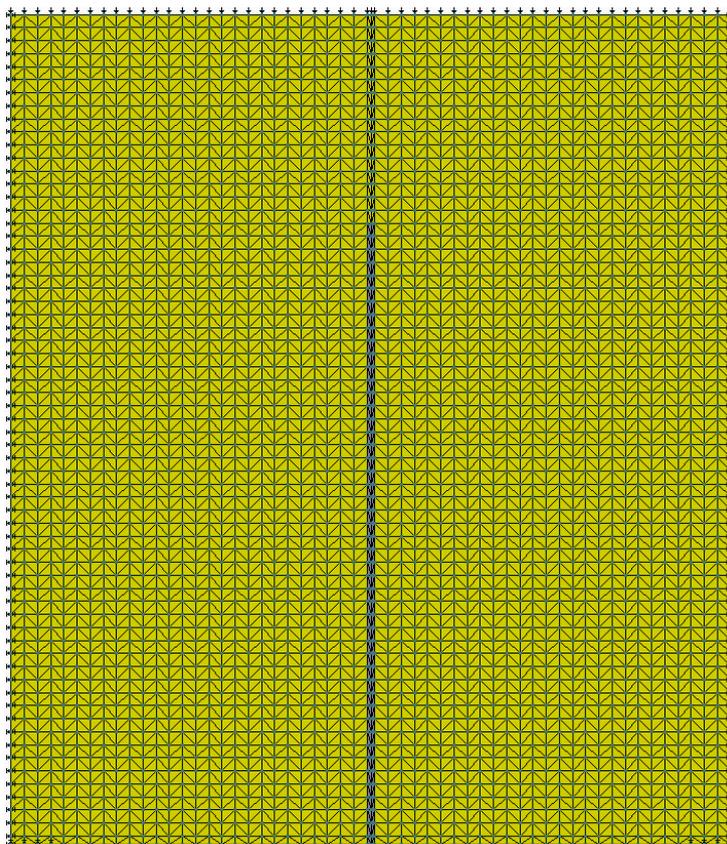


Рисунок 8.6 – Исходная расчетная геомеханическая схема, позволяющая моделировать установку и работу сталеполлимерных анкеров различных конструкций: простого анкера; анкера с полимерными выступами; анкера с винтовыми полимерными выступами; отсутствие анкерного крепления

---

Кроме методического и математического обеспечения расчетов при разработке геомеханической расчетной схемы большое значение имеет правильный учет исходных данных путем задания корректных граничных условий. Изменение граничных условий (изменение нагрузки) позволяет проводить моделирование в условиях изменяющихся глубин разработки, а выбор исходных физико-механических свойств – имитировать конкретные горно-геологические условия слоистого массива горных пород.

Математическое моделирование выполнено для конкретных горно-геологических условий шахты им. А.Ф. Засядько, пласт  $m_3$ , глубина разработки 1200-1300 м. Угольный пласт  $m_3$  содержит коксующийся уголь марки «Ж». Геологическая мощность пласта 1,59-2,14 м. Плотность угля – 1,33 т/м<sup>3</sup>. Пласт опасен по газу, пыли, суфлярным выделениям метана, внезапным выбросам угля и газа, склонен к самовозгоранию.

Расчетная схема содержит 3705 узлов и 7168 элементов, модель упругопластическая с разупрочнением, глубина для сопоставительных исследований выбрана в пределах реально достигнутых глубин разработки (800-1300 м). Для описания физико-механических свойств использованы данные геологической разведки и результаты экспериментальных исследований исходных параметров: модуля упругости  $E$ , коэффициента Пуассона  $\nu$ , объёмного веса  $\gamma$ , сцепления  $C$  и угла внутреннего трения  $\varphi$  для каждого типа элементов, табл. 8.1. В зависимости от приложенной (заданной) нагрузки программа автоматически вычисляет полный комплекс информативных параметров для промежуточных или конечных состояний системы, табл. 8.2.

Результаты исследований представляются в виде таблиц, элемент считается разрушенным, если в результате вычислений получаем разрыв хотя бы одной связи между узлами. По дополнительным подпрограммам по желанию эксперта автоматизировано получают карты, графики, диаграммы любых заранее выбранных сечений или плоскостей с автоматической их визуализацией. На рисунке 8.7 приведены результаты исследований зон неупругих деформаций и зон разрушения для глубин 800 и 1300 м вне зоны опорного давления лавы и дополнительно для глубины 1300 м в зоне влияния лавы, в табл. 8.3 даны количественные характеристики этих зон, в том числе и для глубины 300 м.

Таблица 8.1 – Физико-механические свойства моделируемых горных пород

Наименование	Мод. упруг., E, МПа	Коэф. Пуассона, $\mu$	Объем. вес, МН/м <sup>3</sup>	Сцепление, C МПа	Угол вн. трен., град	Предел прочности, $\sigma_{сж}$ , МПа	Коэф. креп., f	Предел прочности, $\sigma_p$ , МПа
Песчаник креп.	$1,81 \times 10^5$	0,28	0.027	27	45	130,0	13,0	5,4
Алевролит (мин.)	26000	0,27	0,022	10,64	20	30,4	3,0	2,1
Алевролит (средн.)	26000	0,27	0,022	15,2	20	43,4	4,3	3,0
Алевролит (макс.)	26000	0,27	0,022	19,76	20	56,40	5,6	4,0
Аргиллит неуст.	3500	0.29	0.024	7,4	41	32,5	3,3	1,5
Уголь трещ.	2510	0,25	0,014	6	27	19,6	2,0	1,2
Анкер	$2 \times 10^6$	0,28	0,078	800,0	40	420,0		160,0

Таблица 8.2 – Основные количественные информативные параметры математического моделирования при решении геомеханических задач методом конечных элементов

Параметр	Обозна- чение	Ед. изм
Осевые смещения узлов	$u_x, u_y$	м
Максимальные и минимальные главные деформации	$\varepsilon_1, \varepsilon_2$	
Угол наклона $\varepsilon_1$ к оси x	$\gamma_{xy}$	град.
Максимальные и минимальные главные напряжения	$\sigma_1, \sigma_2$	МПа
Угол наклона $\sigma_1$ к оси x	$\alpha$	град.
Касательные напряжения	$\tau_{xy}$	МПа
Зоны неупругих деформаций	ЗНД	м <sup>2</sup>
Зоны разрывных нарушений	ЗРН	м <sup>2</sup>

Анализ полученных результатов показывает на существенную зависимость величин зон неупругих деформаций и зон разрушения от глубины разработки угольного пласта. Необходимо отметить, что выработка проведена в неустойчивых слабых породах, поэтому даже на глубине 300 м происходит незначительное разрушение (шелушение) пород кровли.

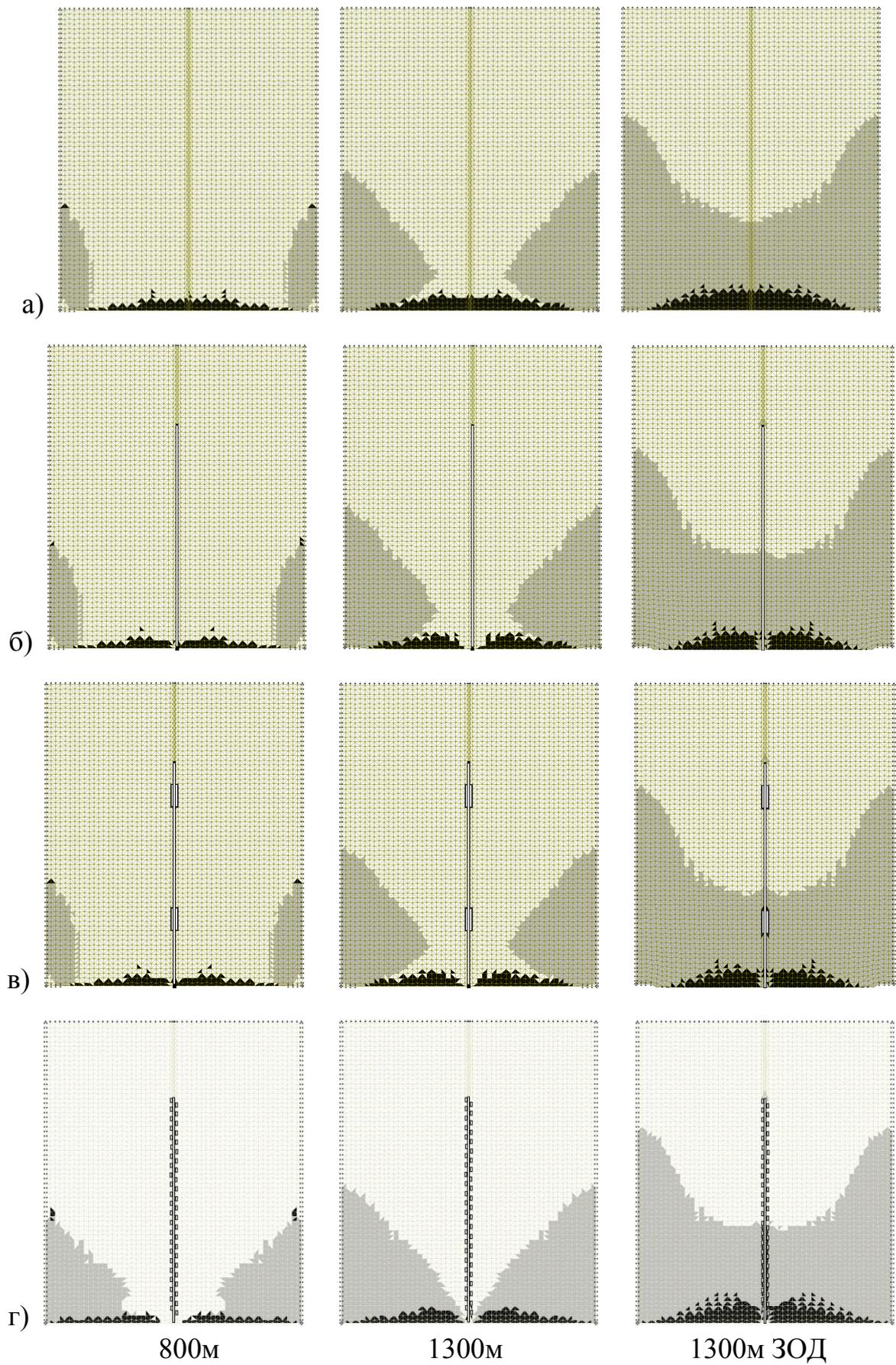


Рисунок 8.7 – Изменение зон неупругих деформаций и зон разрыва (серые и темные элементы) в зависимости от глубины разработки и условий крепления

Таблица 8.3 – Зависимость размеров зон разрывных нарушений и зон неупругих деформаций от глубины заложения выработки и типа анкера

Условия численного эксперимента (алевролит средней устойчивости)		Зоны разрывных нарушений		Зона неупругих деформаций	
	Глубина, м	%	м <sup>2</sup>	%	м <sup>2</sup>
Без анкерования	300	1,01	0,09	2,16	0,19
	800	1,97	0,17	14,5	1,24
	1300	2,85	0,24	24,1	2,05
	1300 (ЗОД)	4,12	0,35	37,9	3,23
Установка анкера в "гладком" шпуре	300	1,00	0,08	2,13	0,18
	800	1,77	0,15	14,4	1,23
	1300	2,46	0,21	23,9	0,24
	1300 (ЗОД)	3,90	0,30	38,8	3,31
Установка анкера в профилированном шпуре с двумя расширениями	300	1,00	0,08	2,13	0,18
	800	1,77	0,15	14,4	1,23
	1300	2,46	0,21	23,8	2,03
	1300 (ЗОД)	4,06	0,34	38,5	3,29
Установка анкера в профилированном по всей длине шпуре	300	0,97	0,08	2,13	0,18
	800	1,71	0,14	14,4	1,23
	1300	2,44	0,20	23,7	2,02
	1300 (ЗОД)	4,28	0,36	38,3	3,26

Отчетливо видно влияние анкера на поддержание кровли выработки, при этом одного анкера явно недостаточно, массив смещается блоком по всей ширине выработки, что в принципе известно [15]. Такие критические условия выбраны специально, чтобы более убедительно доказать преимущества предложенного способа крепления.

На рис. 8.8 показано распределение растягивающих напряжений вокруг сталеполимерного анкера и в самом анкере, закрепленном традиционным способом. Как видно из рисунка, анкер нагружен неравномерно (зонально), что может привести к его разрыву. Это связано с тем, что в связи с недостаточной прочностью слабых горных пород на разрыв основная нагрузка распределяется через опорную шайбу на опорную гайку.

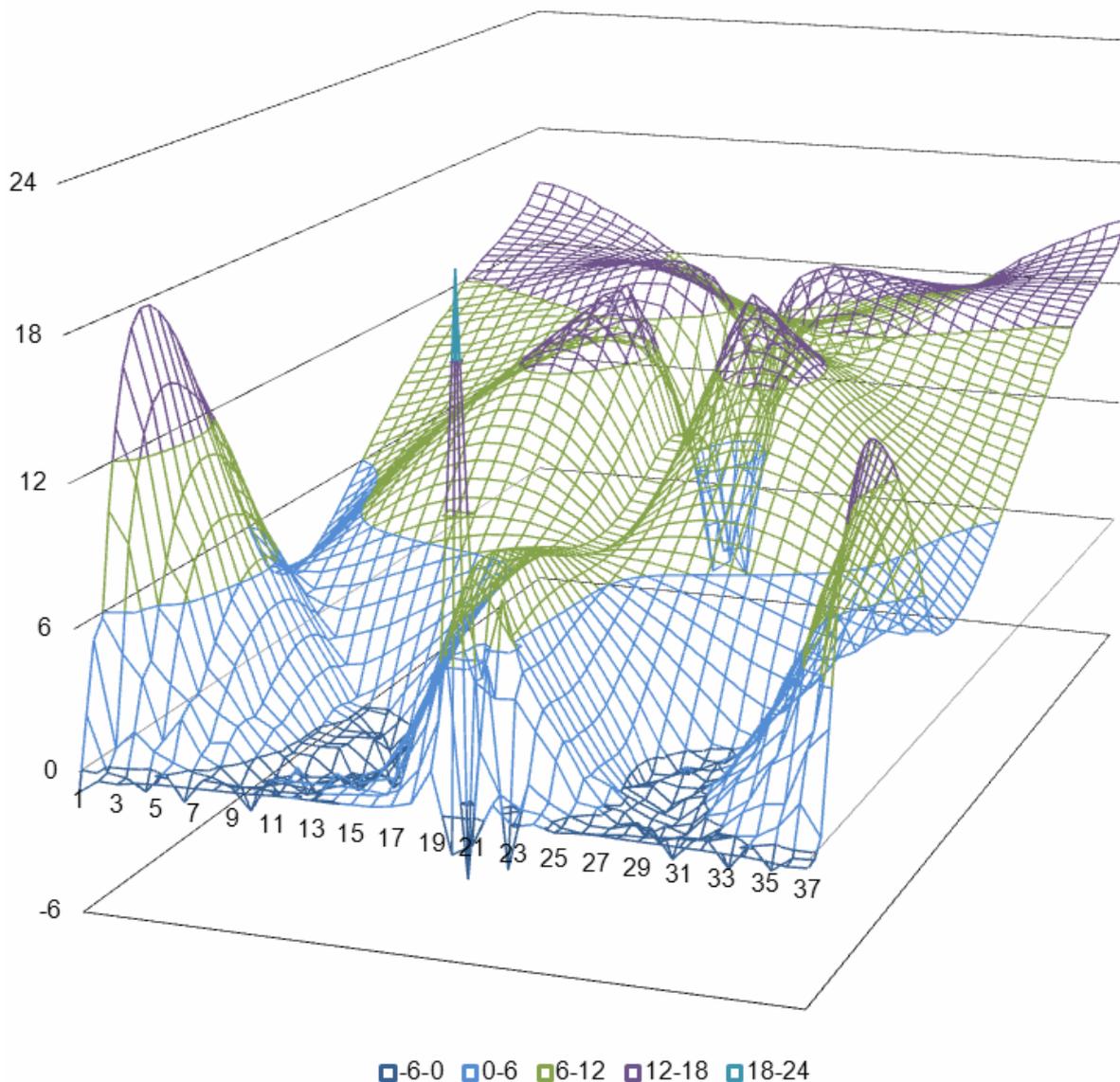


Рисунок 8.8 Распределение главных растягивающих напряжений в зоне закрепления сталеполимерного анкера (1300м алевролит Засядько): по горизонтальной оси – сечение кровли выработки (номера узлов); по вертикальной оси – величина напряжений, МПа; по оси вглубь рисунка – расстояние вглубь массива, то есть, в кровлю выработки

На рис. 8.9 и 8.10 представлены распределения максимальных сжимающих напряжений в породном массиве вокруг сталеполимерных анкеров, полученные по известной, более трудоемкой технологии [120], и по технологии непрерывного бурения с использованием явления динамического хаоса [89]. Сопоставление распределений напряжений показывает на явные преимущества новой технологии, поскольку более равномерное поле напряжений снижает возможность возникновения разрушений.

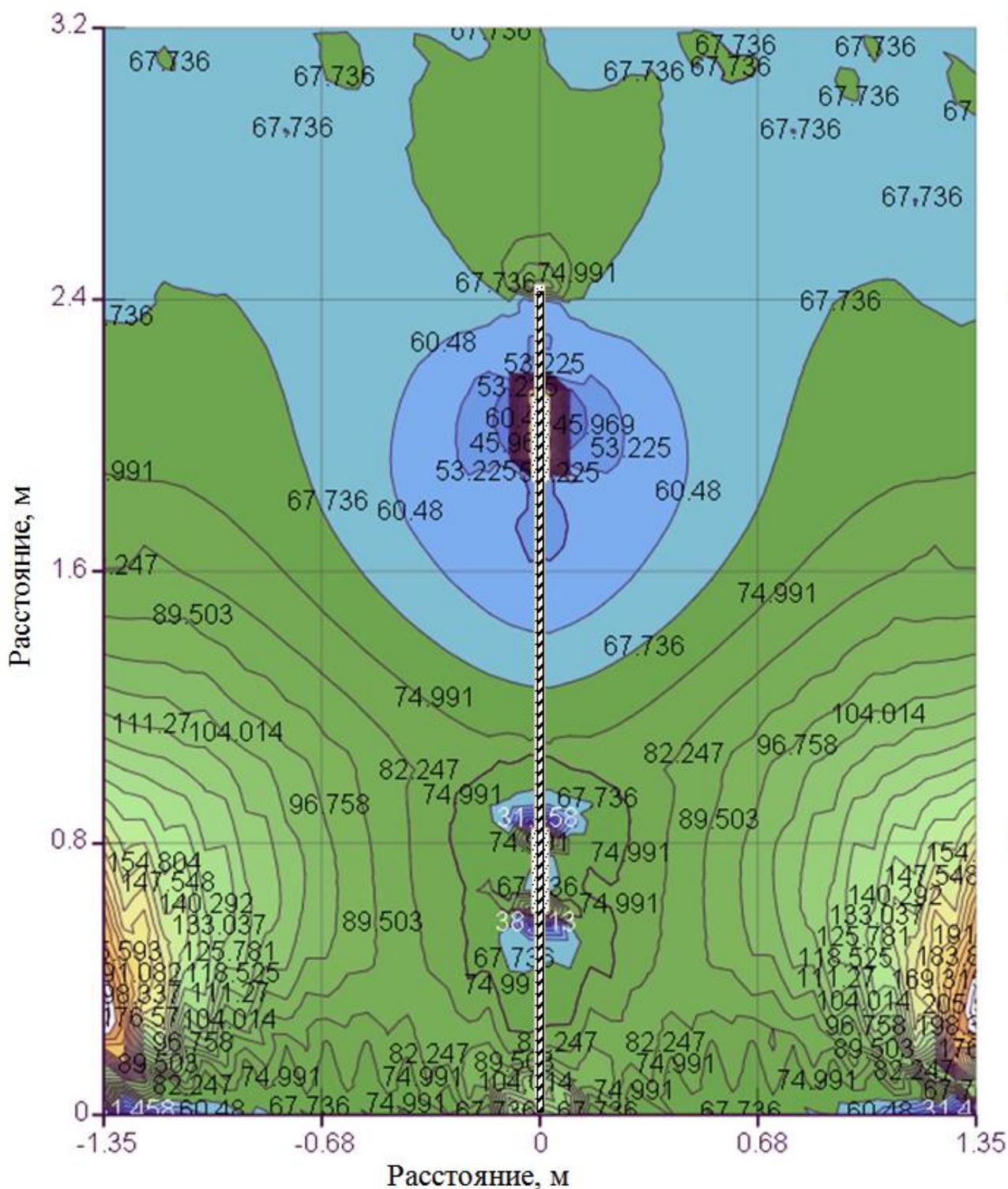


Рисунок 8.9 – Распределение максимальных главных сжимающих напряжений возле сталеполимерного анкера с двумя полимерными выступами (величины значений напряжений на карте представлены в МПа)

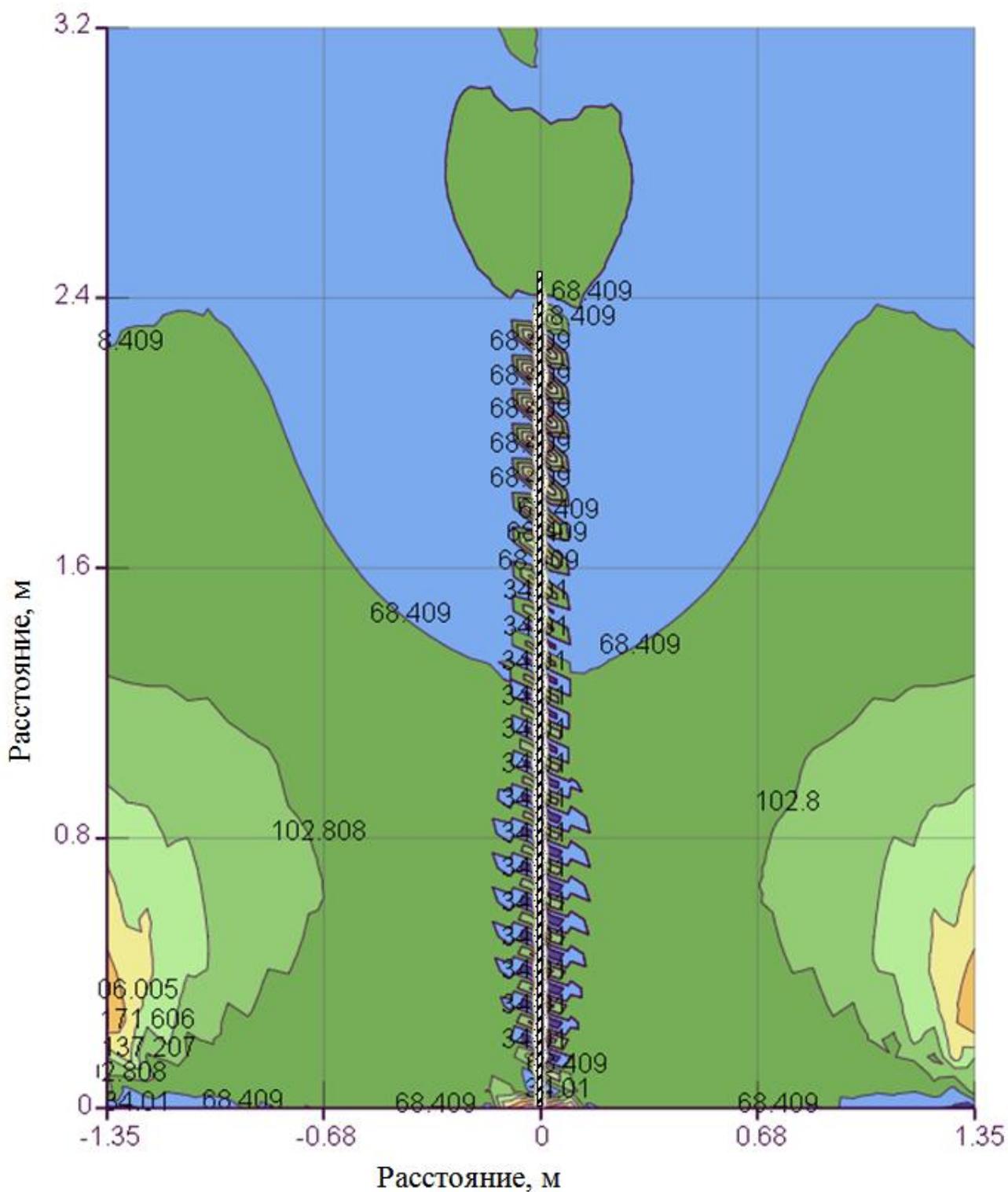


Рисунок 8.10 – Распределение главных сжимающих напряжений возле сталепolyмерного анкера с винтовым полимерным слоем (величины значений напряжений на карте представлены в МПа)

Наиболее убедительно преимущества нового способа крепления сталеполимерного анкера представлены на рис. 8.11, на котором приведены смещения контура кровли подготовительной выработки (откаточного штрека). Данная технология не только позволила увеличить скорость проходки выработки, а существенно повысила их устойчивость, что обеспечило возможность повторного их использования в качестве вентиляционных выработок.

На основе создания алгоритмов и программно-технических средств моделирования и обработки информации разработаны и внедрены методические рекомендации по определению параметров нарезки стенок шпуров для повышения несущей способности анкерного крепления в неустойчивых породах на основе методов аналитической механики и моделирования динамических процессов в детерминированно-хаотических системах. Конкретные параметры буровых ставов, коронок и их конструкций по просьбе администрации АП «Шахта им. А.Ф. Засядько» не публикуются. Расчеты устойчивости выработок при различных вариантах их крепления выполнены с помощью математического моделирования методом конечных элементов.

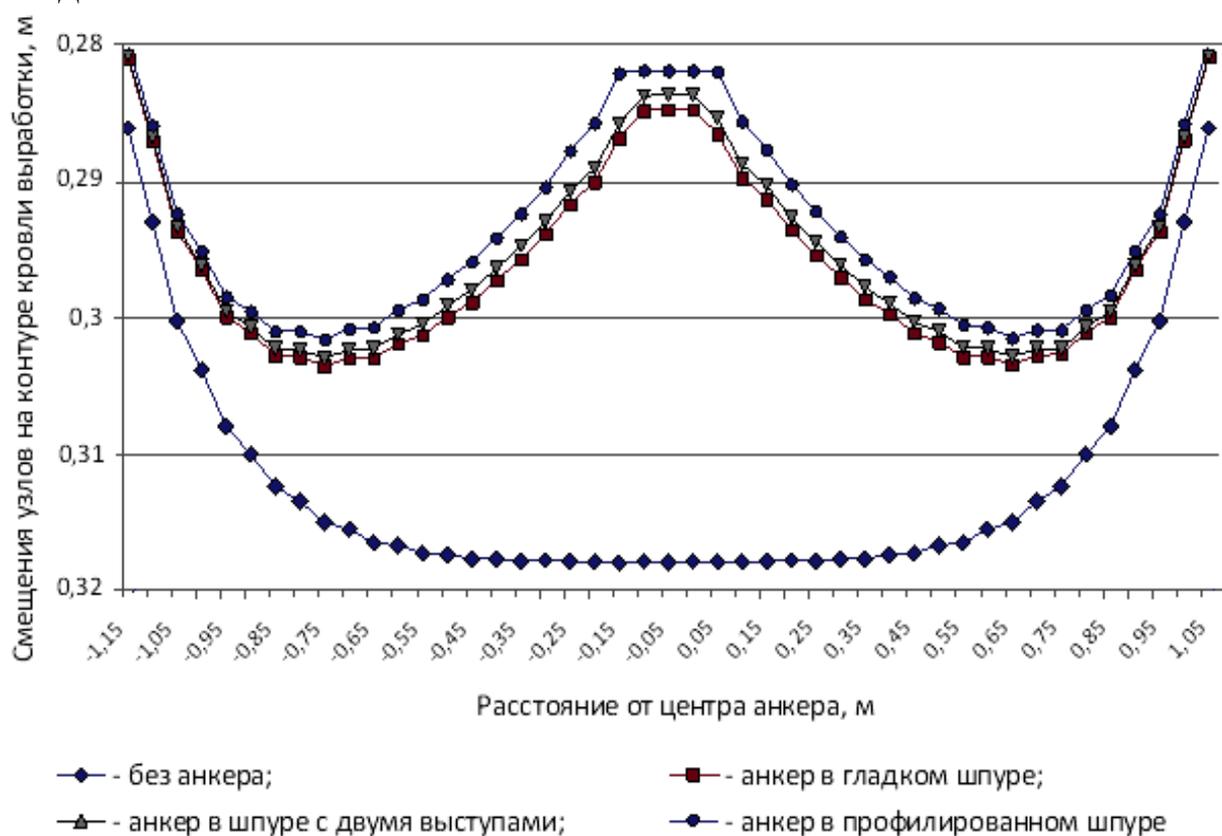


Рисунок 8.11 – Смещение кровли выработки при ее креплении сталеполимерными анкерами

---

#### **8.4 Моделирование динамических процессов для оценки их влияния на состояние протяженных подготовительных выработок на основе k-массовой системы пружинных маятников**

В результате натурных наблюдений, состоящих из инструментальных геофизических измерений, установлена неизвестная ранее закономерность самоорганизации в напряженных грунтовых и породных массивах вокруг протяженных горных выработок, рис. 8.12 (часть тоннеля № 1 канала «Днепр-Донбасс») [84]. Это открытие вносит принципиально новые представления о геомеханических процессах, происходящих в грунтовых и породных массивах вокруг тоннелей, стволов и подготовительных горных выработок.

Экспериментальные исследования проведены авторами открытия № 318. Взаимодействие крепи и массива изучалось путем комплексного использования методов геофизической диагностики. Степень механической связи между крепью и массивом оценивалась с помощью ударно-волновой (виброакустической) диагностики. Исследование локальных участков повышенных механических напряжений производилось путем регистрации импульсного электромагнитного излучения. Оценка трещиноватости массива выполнялась с использованием электрометрии (методы профилирования шпуров и скважин, вертикального электрического зондирования) [84]. В качестве объектов исследований были выбраны протяженные выработки горизонтального и вертикального заложения: железнодорожные тоннели и водоводы, стволы шахт, капитальные и подготовительные выработки и их сопряжения.

Для оценки статического и динамического состояний горных выработок наиболее эффективно применение методов ударно-волнового (виброакустического) контроля и методов математического моделирования. При этом перспективно как применение методов обычного простукивания тоннельных обделок, металлической арочной крепи, породных массивов, так и методов непрерывной записи и обработки механических вибраций работающих машин [58, 132]. На основе методов математического моделирования выполнен анализ результатов исследований квазипериодических процессов для оценки их влияния на состояние выработок [57, 85, 129].

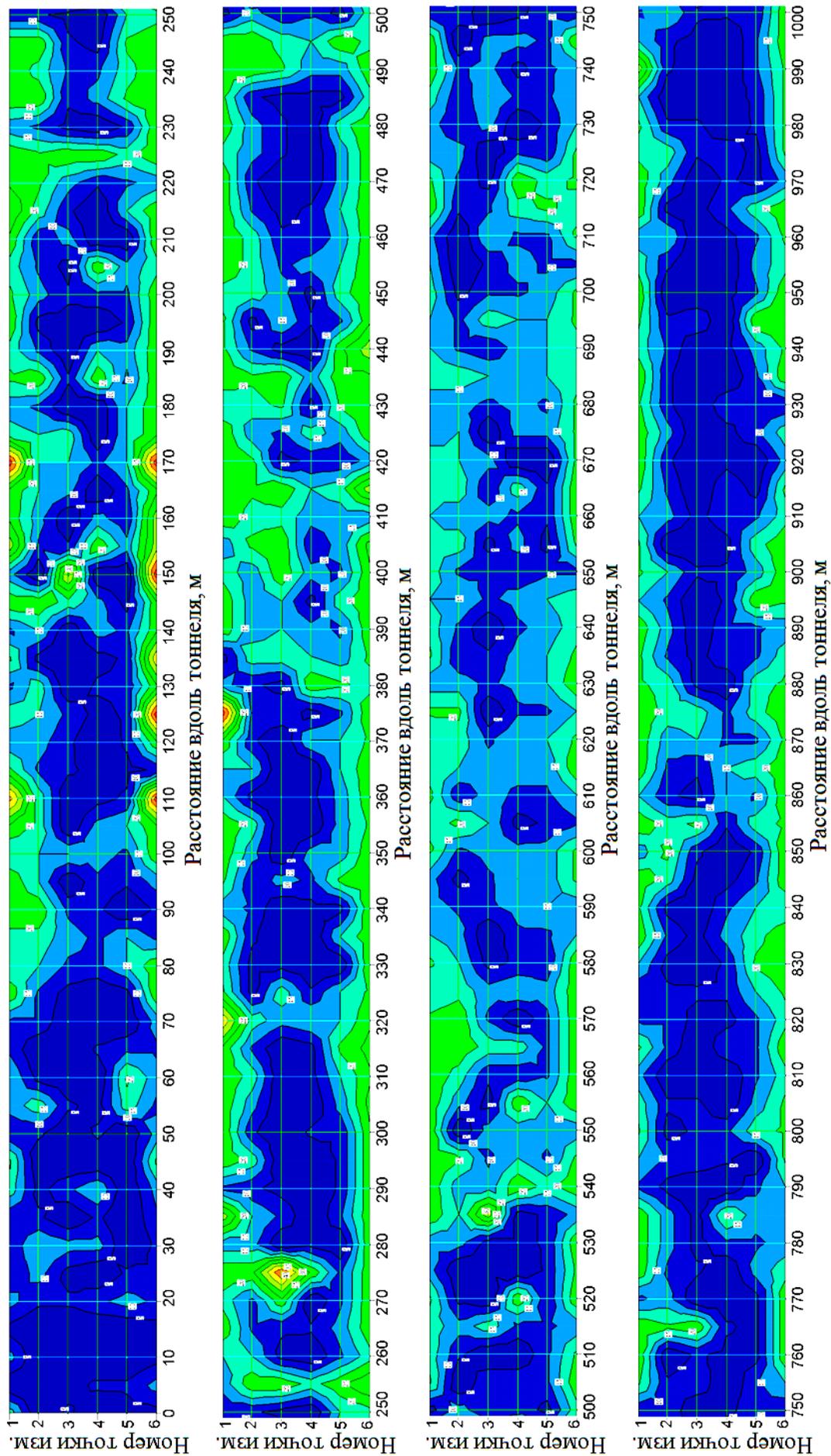


Рисунок 8.12 – Карта пустот за обделкой участка тоннеля № 1 канала «Днепр – Донбасс», подтверждающая квазипериодический характер структурно-фазовой самоорганизации грунтового массива

На рис. 8.13 показана карта пустот, образовавшихся вокруг людского ходка угольной шахты им. А.Ф. Засядько. Если на этой карте явно видно влияние детерминированной составляющей от напряжений, возникающих в результате отработки предыдущих лав, то карта тоннеля № 2 канала «Днепр-Донбасс» свидетельствует о хаотическом характере распределения зональности пустот и нагрузок на обделку тоннеля (рис. 8.14).

Оценим склонность к хаотичности динамических процессов в результате ударных воздействий на тоннельную обделку на основе ее представления в виде системы пружинных маятников, так как обделка обычно состоит из массивных бетонных колец, соединенных упругими элементами. На рис. 8.15 представлены фрагменты исходных  $x$  и возмущенных  $\tilde{x}$  траекторий движения центров масс грузов системы неполносвязных пружинных маятников без дополнительных нелинейных элементов при определении старшего показателя Ляпунова. Для примера приведены траектории первого ( $j=1$ ) и 10-го ( $j=10$ ) грузов системы с 15-ю массами  $m_j$  и упругими связями  $c_j$ . В обоих случаях (а и б) в соответствии с алгоритмом Бенеттина через равные промежутки времени  $T$  в дискретные моменты времени  $t_k$  к текущим значениям динамических переменных системы (на рисунке видны только пространственные координаты  $x_k$ ) добавлялось смещение (вектор возмущения с нормой  $\xi$ ), что приводило к дальнейшему следованию системы по возмущенной траектории. В случае (а) вектор возмущения включал составляющие смещения только по пространственным координатам (обобщенным координатам); обозначим его как вектор с нормой  $\xi_x$ . В случае (б) вектор возмущения проецировался ненулевыми отрезками, как на оси пространственных координат (обобщенных координат), так и на оси скоростей (обобщенных импульсов); обозначим вектор такого возмущения как вектор с нормой  $\xi_{x,v}$ .

На основе результатов моделирования систем указанного класса с разными параметрами можно сделать следующие выводы (см. рис. 2.15 и 8.15). Для масс с меньшими порядковыми номерами ( $j=1, 2, \dots$ ), для которых в значительной степени проявляется влияние удерживающей стационарной связи, наложенной на крайнюю точку первого упругого элемента, возмущенная траектория достаточно быстро сходится с исходной, т. е.  $\tilde{x}_k \ll \tilde{x}'_k = \xi$ .

# ПРОЦЕССЫ САМООРГАНИЗАЦИИ В НАПРЯЖЕННЫХ МАССИВАХ

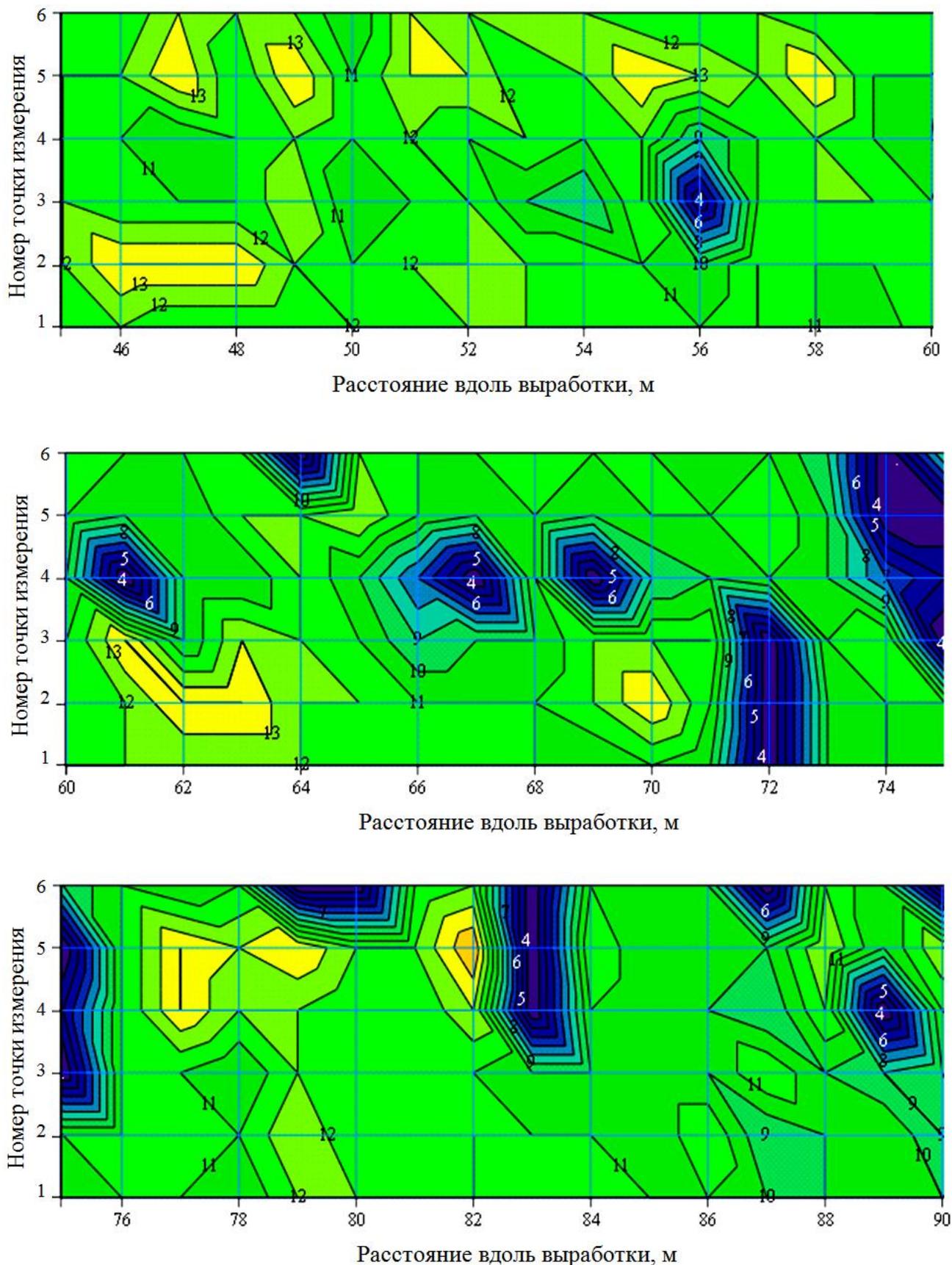


Рисунок 8.13 – Карты распределения зон повышенной нагруженности крепи (темные участки) и пустот закрепного пространства (светлые участки)

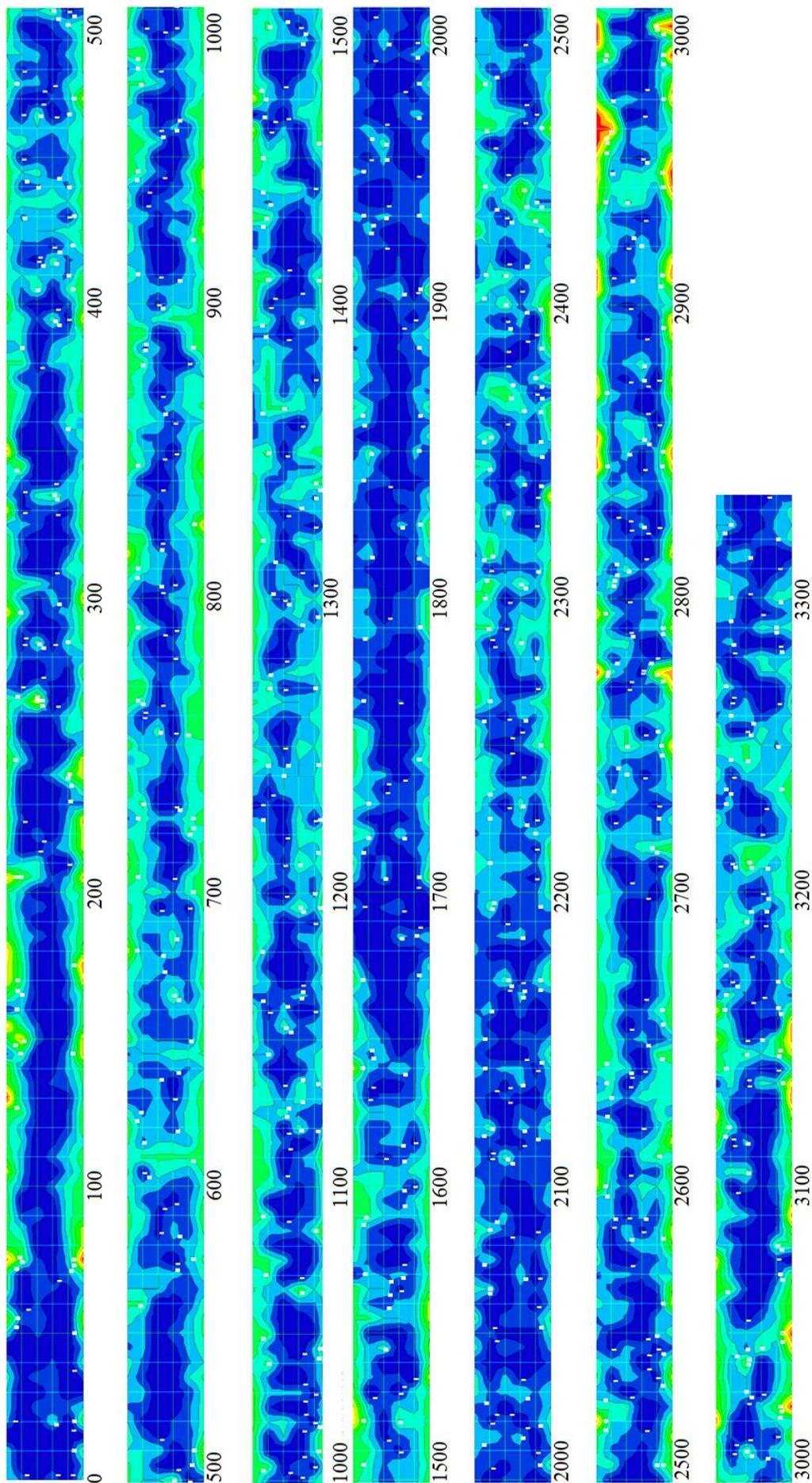


Рисунок 8.14. Карта пустот за обделкой тоннеля № 2 канала «Днепр – Донбасс» (светлые участки) и повышенных нагрузок на обделку (темные участки)

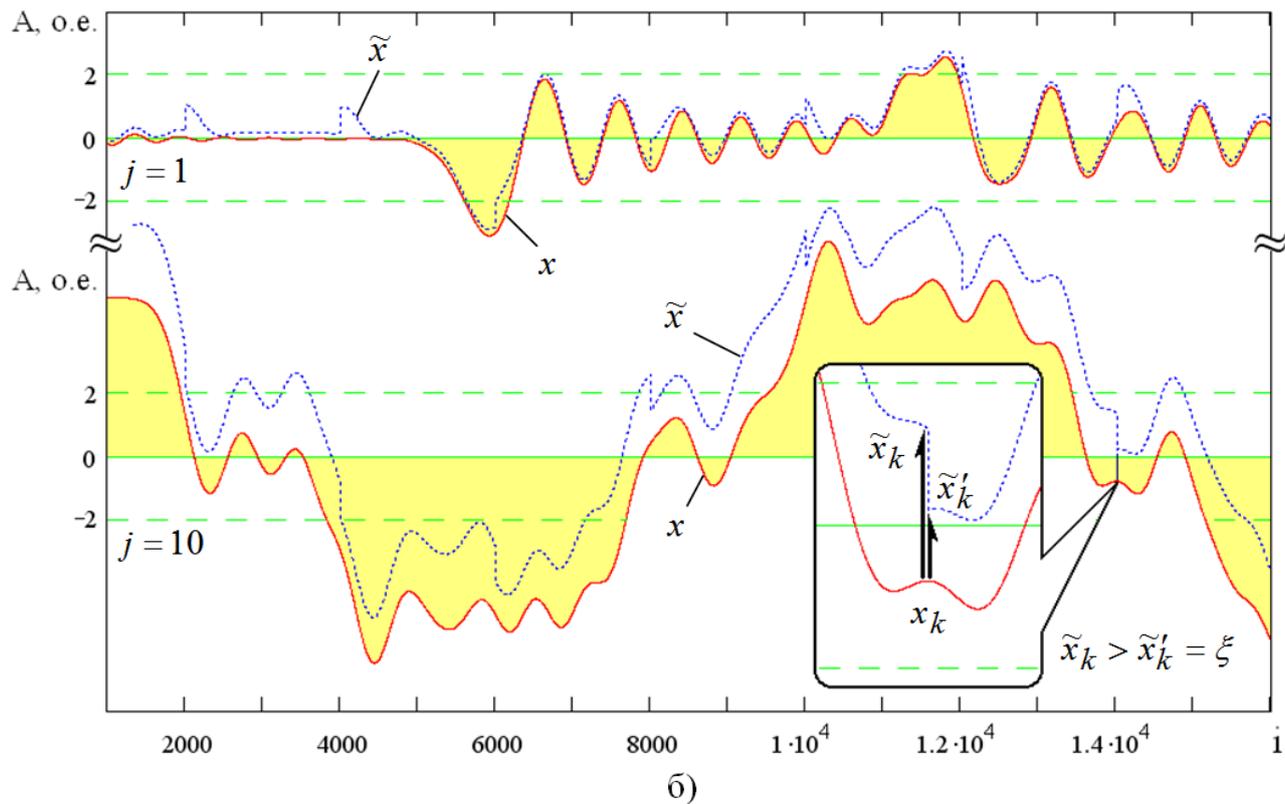
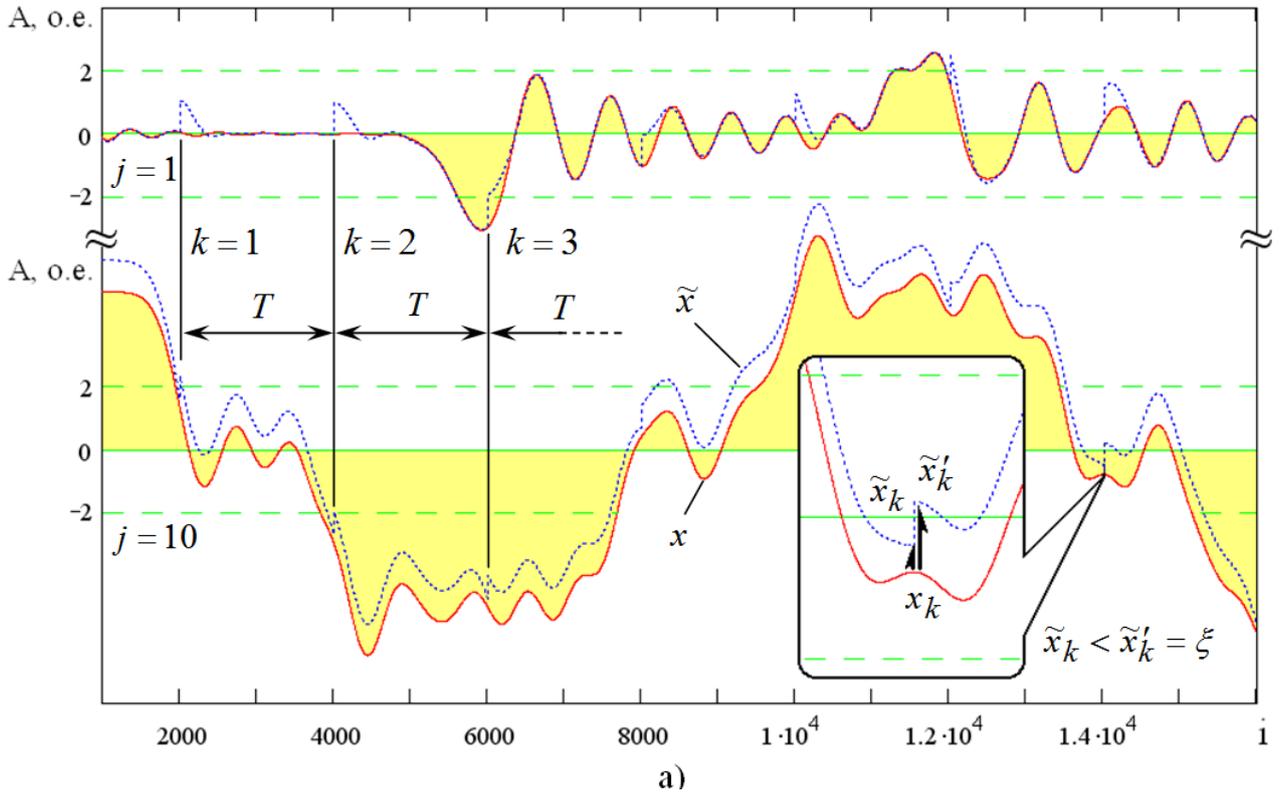


Рисунок 8.15 – Фрагменты исходных и возмущенных траекторий движения центров масс грузов пружинных маятников при определении старшего показателя Ляпунова: а) возмущение только по пространственным координатам; б) возмущение по координатам и скоростям

---

Таким образом, эти массы совершают колебания, являющиеся биениями, которые нельзя считать хаотическими. С увеличением порядкового номера  $j$  сходимость возмущенной и исходной траекторий уменьшается до тех пор, пока они не станут практически одинаковыми, равноотстоящими друг от друга на расстоянии нормы возмущения  $\xi$ , т. е.  $\tilde{x}_k \approx \tilde{x}'_k = \xi$ .

Для масс с большими порядковыми номерами, находящихся у свободного конца линейной цепочки, возмущенная траектория с течением времени удаляется от исходной траектории, имеем  $\tilde{x}_k > \tilde{x}'_k = \xi$ . Однако относительное увеличение нормы вектора возмущения за одинаковый период времени  $T$ , равное  $\tilde{x}_k/\xi$  для массы с номером  $j$ , является практически постоянной величиной и не зависит от номера временного интервала  $k$ . Таким образом можно сделать вывод об отсутствии точек бифуркаций, приводящих к качественно значительному расхождению траекторий. Все же, это приводит к тому, что старшие показатели Ляпунова  $\lambda_k$  увеличиваются с ростом  $k$ , их значения положительные, но они близки к 0, и для всей системы имеем итоговые значения старшего показателя Ляпунова  $\Lambda$  близкие к 0.

Для одной и той же массы с порядковым номером  $j$  большее расхождение исходной и возмущенной траекторий получаем в случае, когда возмущение вносится не только по пространственным координатам, но и по скоростям их изменения (т. е. по обобщенным импульсам), причем влияние второго вида возмущения больше, чем первого (рис. 8.15, а, б). Кроме того, нельзя забывать, что данные расчеты старшего показателя Ляпунова выполнены для линейной, чисто упругой системы, как отмечалось в разделе 2.3 введение нелинейности приводит к хаотизации системы.

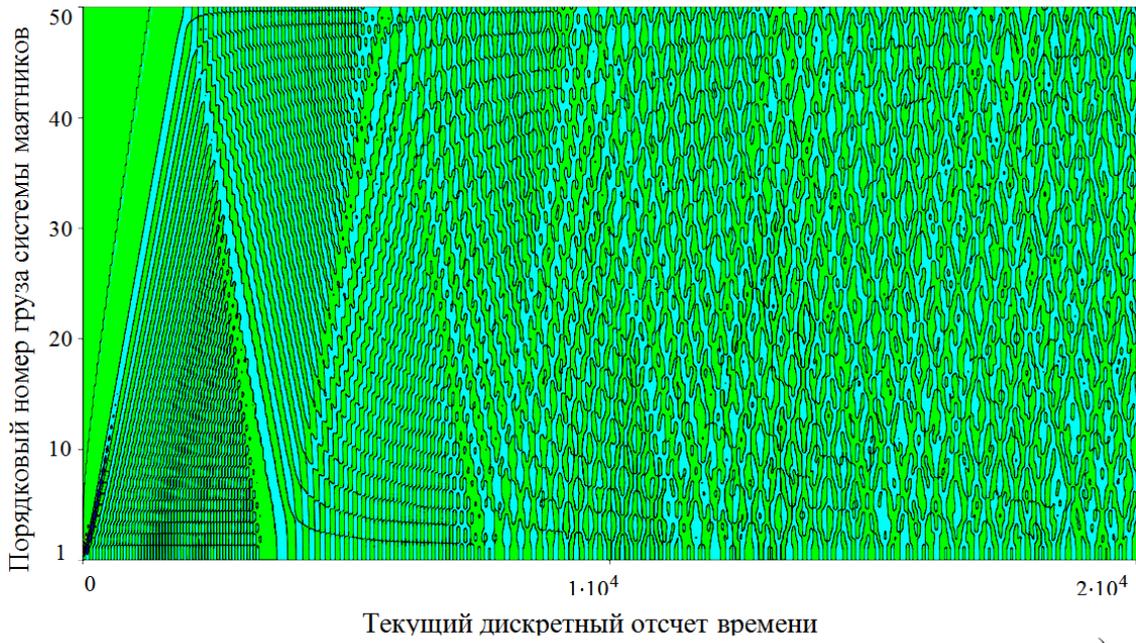
Проведены исследования в оболочке Mathcad полностью связанных систем пружинных маятников, простых систем пружинных маятников вплоть до 150 элементов, и все эти расчеты приводили к удвоению периода, то есть при критических условиях возможен переход к хаосу через удвоение периода. Как уже отмечалось в разделе 1, размерность Хаусдорфа для критического аттрактора Фейгенбаума вычислена с высокой точностью и составляет  $d = 0,538...$  или  $1+d$ , единица добавляется, если есть дополнительное измерение вдоль фазовой траектории. Переход к хаосу через удвоение периода относится ко всем типичным однопараметрическим нелинейным

диссипативным системам, а старший ляпуновский показатель критического аттрактора равен нулю [61]. Нами установлено, что, несмотря на то, что старший ляпуновский показатель для системы пружинных маятников близок к нулю, он все-таки положителен и увеличивается при увеличении количества маятников в системе, рис. 8.16. Искусственная нелинейность, по-видимому, связана с операциями приближенных компьютерных вычислений.

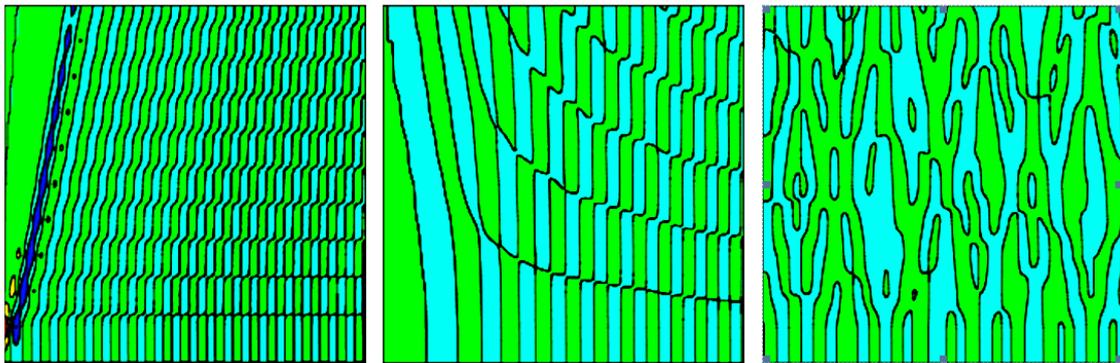
Практическое значение математического моделирования в данном случае заключается в том, что оно позволяет учесть количество элементов в системе, конкретные массы и упругие связи между элементами, разнообразие этих связей, задать любые возмущающие воздействия и оценить реакцию на эти воздействия. На его основе можно разрабатывать новые способы эффективного селективного управления горным давлением, учитывающие самоорганизацию породного массива и позволяющие значительно снизить затраты на ремонт и поддержание транспортных тоннелей, водоводов, стволов рудников и шахт, горизонтальных и вертикальных капитальных и подготовительных выработок.

С другой стороны, участки максимальной реакции на возмущающее воздействие являются потенциальными точками контроля. Разработаны «Методические рекомендации по экспресс-определению упругих и прочностных свойств необработанных образцов горных пород и элементов геокомпозитных конструкций методами неразрушающего контроля».

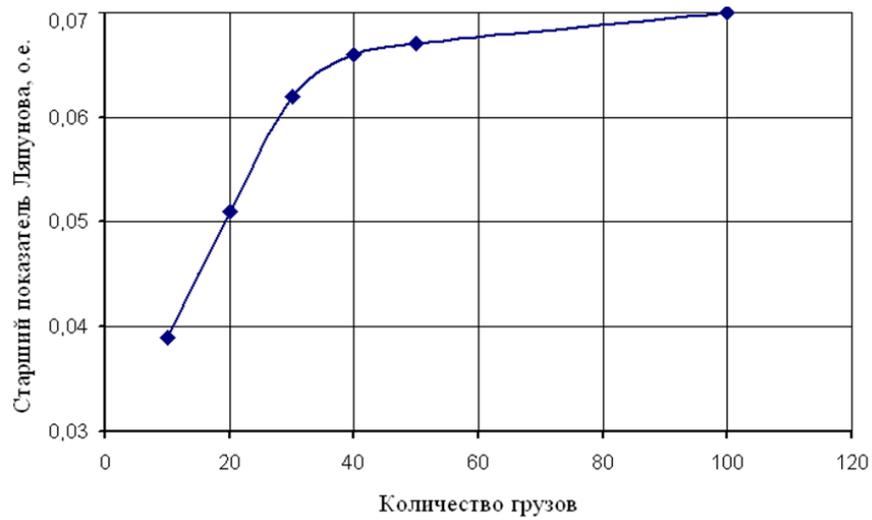
Методы натурных исследований хаотических воздействий не весьма эффективны, поскольку для доведения объекта до разрушения требуется длительное время или ненормативные запредельные нагрузки, а задача текущего контроля, как правило, заключается в противоположном, а именно, в отключении аварийного объекта от питающей сети.



а)



б)



в)

Рисунок 8.16 – Усиление хаотизации системы при увеличении количества маятников: а) и б) волновые картины; в) изменение показателя  $\Lambda$ .

### 8.5 Выводы по разделу

Разработан способ крепления подготовительной выработки в неустойчивых породах сталеполимерными анкерами, учитывающий прочностные свойства вмещающих пород. С помощью математического моделирования методом конечных элементов оценено влияние формы стенок шпура на их работоспособность и установлены преимущества новой технологии, которая обеспечивает равномерную загруженность стенки шпура.

Разработаны и внедрены методические рекомендации по определению параметров нарезки стенок шпуров для повышения несущей способности анкерного крепления в неустойчивых породах. Расчетная длина штреков при отработке западных лав пласта  $l_4$  и восточных лав пласта  $m_3$  составляет 15200 м.

Установлено, что, несмотря на то, что старший ляпуновский показатель для системы пружинных маятников близок к нулю, он все-таки положителен и увеличивается при увеличении количества маятников в системе, поэтому в протяженных горных выработках, закрепленных однотипной арочной крепью, при динамических воздействиях возможно возникновение хаотического распределения зональности разрушения породного массива.

Разработаны «Методические рекомендации по экспресс-определению упругих и прочностных свойств необработанных образцов горных пород и элементов геокомпозитных конструкций методами неразрушающего контроля».

---

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

---

Выполнено компьютерное моделирование классических генераторов хаоса. Выбраны информативные параметры для оценки состояния динамических процессов (начальная потеря устойчивости системы, удвоение периода, потеря устойчивости удвоенного цикла, потеря дискретности спектра), отражающие с учетом поляризации колебаний тенденцию доминирующих связей и возможные фазовые переходы. Установлено, что автоматический контроль системы "крепь-породный массив" при проведении горных выработок обеспечивается при условии идентификации локальных геомеханических объектов как систем с сосредоточенными параметрами, причем контроль изменения нагружения их элементов должен осуществляться с анализом на соответствие критерию квазистационарности параметров реакции системы на возмущающее воздействие.

Предложено для математического моделирования динамических процессов в геотехнических системах применение трехплечевых гравитационных маятников, а также простых, полносвязных и с заранее заданными нелинейностями  $k$ -массовых систем пружинных маятников.

Определены особенности математического моделирования в детерминированно-хаотических системах, в том числе параметры, критерии и допустимые погрешности итераций. Практическое значение моделирования в данном случае заключается в том, что оно позволяет учесть количество элементов в системе, конкретные массы и упругие связи между элементами, разнообразие этих связей, задать виртуально любые возмущающие воздействия, оценить реакцию на эти воздействия при моделировании динамических процессов в горных геотехнических системах.

Обоснованы параметры генератора хаоса для натурального моделирования хаотических воздействий. Разработана и апробирована программа генератора Лоренца с параметрическими коэффициентами из ряда чисел  $2^{\pm k}$  для микроконтроллера, отличающаяся тем, что операции масштабирования осуществляются сдвигом операнда, а это существенно ускорило расчеты и позволило моделировать влияние детерминированного хаоса в режиме реального времени.

Установлено, что сигнал реакции блоковой или плоскопараллельной структуры контролируемого геомеханического объекта на возмущающее воздействие можно представить как суперпозицию конечного числа произведений мнимых периодических сигналов на смещенные единичные прямоугольные импульсы с длительностями, равными периодам соответствующих периодических сигналов. Спектр такого сигнала является суммой сверток прямых преобразований Фурье мнимых периодических сигналов и прямоугольных импульсов, что принципиально позволяет автоматизировать контроль объекта на основе спектров выделенных периодических составляющих.

Разработан и обоснован метод цифровой обработки геофизических сигналов с помощью микропроцессорных средств, заключающийся в автоматическом построении спектрограмм методом двенадцати ординат путем последовательной циклической его обработки от высоких частот к низким и разбиения на временные интервалы, в пределах каждого из которых изменение мгновенного значения отклонения принимается за один период мнимого незатухающего колебательного процесса.

На основе преобразованного для вычислений в двоичном коде метода двенадцати ординат разработана программа быстрого преобразования Фурье для однокристальных микроконтроллеров. При обработке 8-, 10- и 12-разрядных данных динамический диапазон преобразования составляет соответственно 48,1, 60,2 и 72,2 дБ. Ошибка вычисления коэффициентов ряда Фурье составляет 0,134%. Длительность выполнения программы микроконтроллером семейства MCS-51 491 мкс при тактовой частоте 12 МГц, 366 мкс при 16 МГц или 295 мкс при 20 МГц. Для микроконтроллера i80251 длительность выполнения программы соответственно 127 или 95 мкс. Максимальная частота дискретизации сигнала составляет 126,3 кГц для микроконтроллеров i80251.

Выполнено компьютерное моделирование автоматизированной цифровой обработки сигналов, полученных ударно-волновым прозвучиванием структурных единиц крепи и породного массива или реальных технологических сигналов при контроле устойчивости массива. Погрешность определения амплитуд спектральных составляющих лежит в пределах 7-20%, что является удовлетворительным для задач горнотехнического профиля. По сравнению с известными методы являются более информативными,

---

так как позволяют отдельно распознавать продольные волны, нормальные поперечные и изгибные колебания и тем самым выполнять более детальную идентификацию контролируемых технических объектов.

Применительно к задаче контроля параметров технологических процессов проведения горных выработок предложена функциональная структура программного обеспечения автоматизированной системы на основе персональной ЭВМ, отличающаяся разноуровневым подходом к проблеме автоматизации. В качестве основных дополняющих элементов структуры разработаны программы автоматизированной статистической и спектральной обработки исходной геомеханической и технологической информации на персональной ЭВМ, включая выбор и оценку регрессионных моделей и автоматическое построение гистограмм и графиков. На основе программы статистической обработки предложен метод исследований, заключающийся в поочередном выявлении из числа многих параметров двух взаимозависимых и наиболее быстроизменяющихся, которые в дальнейшем могут использоваться для контроля устойчивости геомеханической системы..

Определены параметры аналого-цифровых и микропроцессорных средств автоматизации контроля. Исходя из требований к точности вычислений, в различных приборах используется 12- или 16-разрядный формат представления двоичных чисел с фиксированной запятой с использованием старшего разряда как знакового или формат представления двоичных чисел с плавающей запятой обычной точности. Исходя из конкретных параметров цифровых фильтров (динамического диапазона, частоты среза и крутизны спада амплитудно-частотной характеристики) и требования обеспечения работы в режиме реального времени, определены минимально допустимые времена вычислительных циклов, частоты выборки и необходимые пропускные способности цифрового канала, выбрана современная элементная база, отвечающая этим требованиям. Коэффициент ослабления сигнала на верхних границах полос пропускания цифровых фильтров не ниже 0,97.

На основе современных специализированных малопотребляющих микросхем операционных усилителей, аналого-кодовых и аналого-цифровых преобразователей, логических схем и

однокристалльных микроконтроллеров разработаны и созданы экспериментальные образцы функциональных узлов контроллеров нижнего уровня автоматизированной системы и приборов-индикаторов оперативного контроля устойчивости породного массива, отличающиеся от ранее известных лучшими эргономическими показателями, меньшим энергопотреблением и расширенными сервисными возможностями. Проведена апробация экспериментальных образцов при контроле различных электромеханических установок и горнотехнических процессов, в частности, работы электромашин и насосов насосных станций, устойчивости крепи выработок и массива пород, пустотности заобделочного пространства.

На базе IBM-совместимой персональной ЭВМ создан контрольно-измерительный комплекс, позволяющий автоматически производить качественную оценку и количественные измерения параметров сигналов и частотных характеристик разработанных устройств. Неравномерность амплитудно-частотной характеристики тракта «воспроизведение-запись» комплекса в диапазоне частот 23,780-17220 Гц не превышает 2,5 дБ, в случае использования специальных тестовых сигналов – 0,5 дБ. Уровни собственных шумов замкнутого измерительного тракта при использовании встроенного генератора и постоянной составляющей на входе аналого-цифрового преобразователя – 49,1 дБ (0,35% от максимального уровня сигнала). Уровень собственных шумов при отключенном входе не более – 66 дБ (0,05%).

С использованием обоснованных методов и разработанных технических средств автоматизации виброакустического контроля выполнены натурные исследования системы «крепь-породный массив» в условиях, когда массив представлен скальными, осадочными породами и грунтом, определены участки повышенных нагрузок в протяженных горных выработках и пустотности заобделочного пространства, рассмотрены особенности обработки полученной информации, дополняющие «Руководство по геофизической диагностике состояния системы «крепь-породный массив» вертикальных стволов».

Разработанные средства и методы автоматизации контроля позволили повысить надежность обнаружения скрытых заколов и отслоений кровли, ускорить операции по ее оборке, улучшить качество крепления за счет рациональной забутовки, а в целом –

---

повысить темпы проведения горных выработок, снизить долю ручного труда и затраты на их поддержание.

Разработана упрощенная вычислительная схема определения гармонического состава акустических и электрических сигналов по методу 24-х ординат, позволяющая с достаточной точностью обеспечить обработку сигнала в режиме реального времени.

Методом конечных элементов оценено влияние формы стенок шпура на работоспособность сталеполимерного анкера в неустойчивых породах и установлены преимущества новой технологии, обеспечивающей равномерную загруженность пород.

Для оценки динамического состояния геотехнических систем разработаны математические модели и средства моделирования динамических процессов, установлены закономерности их развития в системе «горный технический объект - породный массив» при креплении подготовительных выработок в неустойчивых породах глубоких угольных шахт. Результаты работы позволяют повысить уровень эффективности и безопасности горных работ.

Разработаны «Методические рекомендации по экспресс-определению упругих и прочностных свойств необработанных образцов горных пород и элементов геокомпозитных конструкций методами неразрушающего контроля», которые учитывают поляризацию акустических колебаний.

---

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

---

1. Автоматизированная система диагностики напряженно-деформированного состояния горного массива / В.В. Некрасов, В.Г. Казанцев, В.И. Магдыч, М.Г. Потапов. – М.: Изд-во МГГУ, 1995. – 75 с.
2. Айфичер Эммануил С. Цифровая обработка сигналов: практический подход / Айфичер Эммануил С., Джервис Барри У.; пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 992 с.
3. Анциферов М.С. Сейсмоакустические исследования и проблемы прогноза динамических явлений / М.С. Анциферов, Н.Г. Анциферова, Я.Я. Коган. – М.: Наука, 1971. – 110 с.
4. Ардашев К.А. Методы и приборы для исследования проявлений горного давления / К.А. Ардашев, В.И. Ахматов, Г.А. Катков. – М.: Недра, 1981. – 128 с.
5. Арнольд В.И. Теория катастроф. – Изд. 3-е, дополненное / В.И. Арнольд. – М.: Наука, 1990. – 128 с.
6. Байконуров О.А. Основы горной геофизики / О.А. Байконуров, В.А. Мельников. – Алма-Ата: Наука, 1970. – 326 с.
7. Барановский О.К. Применение звуковой карты для анализа формы и спектра сигналов / О.К. Барановский // Радиолюбитель. – 1998. – № 12. – С. 8 – 9.
8. Белов А.В. Конструирование устройств на микроконтроллерах / А.В. Белов. – СПб.: Наука и техника, 2005. – 256 с.
9. Белозеров В.Е. Геометрический подход к проблеме стабилизации систем управления / В.Е. Белозеров, С.А. Волкова. – Днепропетровск: Изд-во Днепропет. нац. ун-та, 2006. – 440 с.
10. Бендат Дж. Применения корреляционного и спектрального анализа. / Бендат Дж., Пирсол А.; пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 312 с.
11. Берже П. Порядок в хаосе. О детерминистском подходе к турбулентности / Берже П., Помо И., Видаль К.; пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 367 с.
12. Бирюков С.А. Цифровые устройства на МОП-интегральных микросхемах / С.А. Бирюков. – М.: Радио и связь, 1990. – 128 с.
13. Большевцев А.Д. Технический контроль и его разновидности (Элементы методологического анализа) / А.Д. Большевцев, Л.Д. Большевцева // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – Луганськ: СНУ, 2004. – № 2(72). – С. 22 – 30.
14. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах / Л.М. Бреховских. – М.: Наука, 1973. – 343 с.
15. Булат А.Ф. Опорно-анкерное крепление горных выработок угольных шахт / А.Ф. Булат, В.В. Виноградов. – Днепропетровск: Вільпо, 2002. – 372 с.
16. Булат А.Ф. Фракталы в геомеханике / А.Ф. Булат, В.И. Дырда. – К.: Наук. думка, 2005. – 358 с.
17. Бутенин Н.В. Введение в аналитическую механику / Н.В. Бутенин, Н.А. Фуфаев. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. – 256 с.
18. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
19. Викторов С.Д. Разрушение массива горных пород и риск техногенных катастроф / С.Д. Викторов, М.А. Иофис, В.Н. Одинцев // Горный журнал, 2005. – № 4. – С. 30 – 34.
20. Виноградова М.Б. Теория волн / М.Б. Виноградова, О.В. Руденко, А.П. Сухоруков. – М.: Наука, 1990. – 432 с.
21. Владимиров С.Н. Порождает ли знаковая корреляция квазипериодических колебаний с иррационально связанными частотами детерминированный хаос? / С.Н. Владимиров // Успехи физических наук, 2004. – Том 174. – № 2. – С. 216 – 220.
22. Временные методические указания по экспресс-определению упругих свойств горных пород ультразвуковым методом на необработанных образцах керна геологоразведочных скважин: РД / Яланский А.А., Паламарчук Т.А., Скипочка С.И. и др. – Л.: ВНИМИ, 1987. – 39 с.
23. Гардинер К.В. Стохастические методы в естественных науках / К.В. Гардинер; пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 528 с.
24. Геомеханічний моніторинг підземних геотехнічних систем / А.В. Анциферов, С.І. Скіпочка, А.О. Яланський Т.А. Паламарчук та ін. – Вид-во «Ноулідж», 2010. – 253 с.

- 
25. Геофизические методы исследования скважин / Под ред. В.М. Запорожца // Справочник геофизика. – М., 1983. – 591 с.
26. Гилл Ф. Практическая оптимизация / Гилл Ф., Мюррей У., Райт М.; пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 509 с.
27. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф / Гилмор Р.; пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – Т. 1. – 350 с. – Т. 2. – 285 с.
28. Гликман А.Г. Оценка и диагностирование межслоевых контактов в угленосной толще / А.Г. Гликман // Горная геофизика: Материалы Всесоюзного семинара. – Тбилиси, 1989. – Ч. 1. – С. 149-150.
29. Глушко В.Т. Геофизический контроль в шахтах и тоннелях / В.Т. Глушко, В.С. Ямщиков, А.А. Яланский. – М.: Недра, 1987. – 278 с.
30. Говоруха В.В. Механика взаимодействия рельсового пути, подвижных транспортных средств и смежных устройств / В.В. Говоруха. – Днепропетровск: Лира, 2006. – 448 с.
31. Голинько В.И. Контроль взрывоопасности горных выработок шахт / В.И. Голинько, А.К. Котляров, В.В. Белоножко. – Днепропетровск: Наука и образование, 2004. – 208 с.
32. Горбачевич Ф.Ф. Отражение и прохождение упругих волн на границе раздела сред / Ф.Ф. Горбачевич. – Апатиты: КФ АН СССР, 1985. – 98 с.
33. Горная геофизика: Сб. информационных листов по приборам. – Тбилиси: Мецниереба, 1983. – 87 с. – 2 вып., 1985. – 48 с.
34. Горобець Ю.І. Фрактальна геометрія у природознавстві: Навчальний посібник / Ю.І. Горобець, А.М. Кучко, І.Б. Вавилова. – К.: Наук. думка, 2008. – 232 с.
35. Гуртовцев А.Л. Программы для микропроцессоров: Справ. пособие / А.Л. Гуртовцев, С.В. Гудыменко. – Мн.: Высш. шк., 1989. – 352 с.
36. Гутников В.С. Фильтрация измерительных сигналов / В.С. Гутников. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 190 с.
37. Дженкинс Г. Спектральный анализ и его приложения / Дженкинс Г., Ваттс Д. – Т. 1. – М.: Мир, 1971. – 316 с. – Т. 2. – М.: Мир, 1972. – 288 с.
38. Джордейн Р. Справочник программиста персональных компьютеров типа IBM PC, XT и AT / Джордейн Р.; пер. с англ. – М.: Финансы и статистика, 1991. – 544 с.
39. Дзенис В.В. Применение ультразвуковых преобразователей с точечными контактами для неразрушающего контроля / В.В. Дзенис. – Рига: Зинатне, 1983. – 263 с.
40. Дискретные свойства геофизической среды: Сборник научных трудов. – М.: Наука, 1989. – 174 с.
41. Дьяконов В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник / В. Дьяконов, В. Круглов. – СПб.: Питер, 2001. – 480 с.
42. Дьяконов В.П. MathCAD 7.0. в математике, физике и в Internet / В.П. Дьяконов, И.В. Авраменкова. – М.: «Нолидж», 1999. – 352 с.
43. Дьяконов В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке бейсик для персональных ЭВМ / В.П. Дьяконов. – М.: Наука, 1987. – 240 с.
44. Дьяконов Д.И. Общий курс геофизических исследований скважин / Д.И. Дьяконов, Е.И. Леонтьев, Г.С. Кузнецов. – М.: Недра, 1984. – 432 с.
45. Задков В.Н. Компьютер в эксперименте: Архитектура и программные средства систем автоматизации / В.Н. Задков, Ю.В. Пономарев. – М.: Наука, 1988. – 376 с.
46. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / Зенкевич О.; пер. с англ. / Под ред. Б.Е. Победри. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
47. Злобин В.К. Программирование арифметических операций в микропроцессорах / В.К. Злобин, В.Л. Григорьев. – М.: Высшая школа, 1991. – 303 с.
48. Золотухин И.А. Анализ колебаний в многоконтурных электрических моделях теплогидравлических систем: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05. 09. 05 «Теоретическая электротехника» / И.А. Золотухин. – М.: Московский энергетический институт, 2008. – 19 с.

49. Иконникова Н.А. Математическое моделирование работы анкеров в неустойчивых породах / Н.А. Иконникова, А.И. Слащев // Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ-2011). Материалы X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Томск: Изд-ство ТГУ, 2011. – Ч. 2. – С. 96 – 101.
50. Иконникова Н.А. Особенности моделирования динамики хаотических процессов в детерминированных системах методами аналитической механики / Н.А. Иконникова // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ, 2007. – № 73. – С. 263-280.
51. Интегральные микросхемы энергонезависимой памяти 28F008SA, 28F008SA-L; пер. с англ. – М.: Изд-во «Бином» и ТОО «Конкорд», 1992. – 78 с.
52. Кашьяп Р.Л. Построение динамических стохастических моделей по экспериментальным данным / Кашьяп Р.Л., Рао А.Р.; пер. с англ. – М.: Наука, 1983. – 384 с.
53. Кирничанский Г.Т. Элементы теории деформирования и разрушения горных пород / Г.Т. Кирничанский. – К.: Наук. думка, 1989. – 184 с.
54. Козаченко В.Ф. Микроконтроллеры: Руководство по применению 16-разрядных микроконтроллеров Intel MCS-196/296 во встроенных системах управления / В.Ф. Козаченко. – М.: Изд-во ЭКОМ, 1997. – 688 с.
55. Коншин Г.Г. Вибросейсмическая диагностика эксплуатируемого земляного полотна / Г.Г. Коншин. – М.: Транспорт, 1994. – 216 с.
56. Кораблев А.А. Современные методы и приборы для изучения напряженного состояния массива горных пород / А.А. Кораблев. – М.: Наука, 1969. – 128 с.
57. Корсун В.И. Математическое моделирование динамики хаотических процессов в инженерно-экологических системах / В.И. Корсун, Алекс.А. Яланский, Н.А. Иконникова, Т.А. Яровая // Математические методы в технике и технологиях. Международная научная конференция ММТТ – 23. – Саратов: Саратовский государственный технический университет, 2010. – Т. 5. – С. 51 – 54.
58. Корсун В.И. Обоснование параметров микропроцессорного генератора сигналов динамического хаоса / В.И. Корсун, Н.А. Иконникова, Алекс.А. Яланский // Матеріали міжнародної конференції “Форум гірників – 2009”. – Дніпропетровськ: НГУ, 2009. – Т. № 4. – С. 263 – 271.
59. Крауч С. Методы граничных элементов в механике твердого тела / С. Крауч, А. Старфилд; пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 328 с.
60. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / В.Е. Кузьмичев. – К.: Наук. думка, 1989. – 864 с.
61. Кузнецов С.П. Динамический хаос / С.П. Кузнецов. – М.: Физматлит, 2001. – 295 с.
62. Куксенко В.С. Локализация разрушения в горных породах на разных масштабных уровнях / В.С. Куксенко, В.А. Мансуров // ФТПРПИ. – 1986. – №3. – С. 49 – 55.
63. Куценко Ю.Е. Виброакустическая диагностика машин и механизмов при сервисном обслуживании мелиоративных объектов / Ю.Е. Куценко. – К.: НПФ ЭЛЕН, 1996. – 112 с.
64. Ланцош К. Вариационные принципы механики / Ланцош К. – М.: Мир, 1965. – 408 с.
65. Ларіонов Г.І. Вплив діаметра шпура на якість закріплення вантажного металополімерного анкера / Г.І. Ларіонов, Ю.В. Нечитайло // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ, 2007. – № 73. – С. 142 – 150.
66. Лоскутов А.Ю. Введение в синергетику / А.Ю. Лоскутов, А.С. Михайлов. – М.: Наука, 1990. – 270 с.
67. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул: – М.: Высшая школа, 1988. – 239 с.
68. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы / Мандельброт Б.; пер. с англ. – М.: Ин-т компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
69. Марюта А.Н. Теория моделирования колебаний рабочих органов и ее приложения / А.Н. Марюта. – Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 1991. – 146 с.
70. Математическое моделирование / Редакторы Дж. Эндрюс, Р. Мак-лоун; пер. с англ. – М.: Мир, 1979. – 277 с.
71. Метод граничных элементов в задачах горной геомеханики / Л.В. Новикова, П.И. Пономаренко, В.В. Приходько, И.Т. Морозов. – Днепропетровск: Наука и образование, 1997. – 180 с.

72. Методические рекомендации по экспресс-определению упругих и прочностных свойств необработанных образцов горных пород и элементов геокомпозитных конструкций методами неразрушающего контроля / А.Ф. Булат, М.А. Ильяшов, Н.А. Иконникова и др. – Днепропетровск: Монолит, 2011. – 48 с.
73. Методические указания по сейсмоакустическим и электромагнитным методам получения критериев степени удароопасности / Смирнов В.А., Проскуряков В.М., Скаун А.П., Бляхман А.С. и др. – Л.: ВНИМИ, 1986. – 30 с.
74. Методы и средства решения задач горной геомеханики. Под ред. Г.Н.Кузнецова, К.А.Ардашева, Н.А.Филатова. – М.: Недра, 1977. – 248 с.
75. Михалев А.И. Цифровая обработка данных: от Фурье к Wavelets / А.И. Михалев. – Днепропетровск: Системные технологии, 2007. – 200 с.
76. Мошиц Г., Хорн П. Проектирование активных фильтров / Мошиц Г., Хорн П.; пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 320 с.
77. Надежность технических систем: Справочник / Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин и др. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
78. Николайчук О. x51-совместимые микроконтроллеры фирмы Signal / О. Николайчук. – М.: ООО «ИД СКИМЕН», 2002. – 472 с.
79. Николс Г. Самоорганизация в неравновесных системах / Николс Г., Пригожин И.; пер. с англ. – М.: Мир, 1979. – 512 с.
80. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений. – 2-е изд., перераб и доп. / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.
81. Оллсон Густав. Цифровые системы автоматизации и управления / Оллсон Густав, Пиани Джангуида. – СПб.: Невский диалект, 2001. – 557 с.
82. Орнатський П.П. Вступ до методології науки про вимірювання / П.П. Орнатський. – К.: ІСЛО, 1994. – 160 с.
83. Основы моделирования сложных систем / Под редакцией И.В.Кузьмина. – К.: Вища школа, 1981. – 485 с.
84. Открытие № 318. Закономерность пространственно-временной структурно-фазовой самоорганизации грунтовых и породных массивов вокруг протяженных подземных выработок / Л.В. Байсаров, М.А. Ильяшов, В.В. Левит, Т.А. Паламарчук, В.Н. Сергиенко, В.Б. Усаченко, А.А. Яланский (ст.) // Научные открытия, идеи, гипотезы (1992-2007). Информационно-аналитический обзор. – М.: МААНОН, 2008. – С. 298-299.
85. Оценка хаотичности процессов, происходящих в горных технических системах, особенности управления и использования / А.А. Яланский, И.Н. Слащев, Алекс.А. Яланский, Н.А. Иконникова, А.А. Цікра // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2010. – № 91. – С. 159 – 172.
86. Пароль Н.В. Знакосинтезирующие индикаторы и их применение: Справочник / Н.В. Пароль, С.А. Кайдалов. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.
87. Пат. № 39204 Україна, МПК (2009) E21D 20/00; E21B 19/00. Бокій Б.В. Буровий постав для нарізки шпура / Б.В. Бокій, О.А. Цікра, В.С. Возіянов, В.Б. Ковбасенко, А.Т. Курносов, С.А. Курносов, І.М. Слащов; заявник і власник патенту ІГТМ НАН України; опубл. 10.02.2009.
88. Пат. № 41968 Україна, МПК (2009) E21D 20/00. Цікра О.А. Спосіб закріплення анкера в слабких породах / О.А.Цікра, В.С.Возіянов, В.Б.Ковбасенко, А.Т.Курносов, С.А.Курносов, І.М.Слащов; заявник і власник патенту ІГТМ НАН України; опубл. 25.06.2009.
89. Пат. № 58761 Україна, МПК (2011.01) E21D 20/00 Цікра О.А. Спосіб закріплення анкера у породах гірничої виробки / О.А. Цікра, П.Є. Філімонов, В.С. Возіянов, І.М. Слащов, С.А. Курносов, Н.А. Іконнікова, Н.В. Коваль; заявник і власник патенту ІГТМ НАН України; опубл. 26.04.2011.
90. Петренко В.І. Розрахунок трисклепінчастих станцій метрополітену глибокого закладення / В.І. Петренко, В.Д. Петренко, О.Л. Тютюкін. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2004. – 176 с.
91. Петров И.В. Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приемы прикладного проектирования / И.В. Петров; под ред. проф. В.П. Дьяконова. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 256 с.
92. Півняк Г.Г. Електромеханічні системи енергонапружених барабанних млинів / Г.Г. Півняк, В.І Кириченко. – Дніпропетровськ: НГА України, 2000. – 166 с.

93. Постон Т. Теория катастроф и ее приложения. / Постон Т., Стюард И.; пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 608 с.
94. Приборы для неразрушающегося контроля материалов и изделий: Справочник / А.С. Боровиков, Э.И. Вайнберг, В.И. Горбунов и др. – М.: Машиностроение, 1986. – Кн. 1. – 487 с. – Кн. 2. – 351 с.
95. Программирование микропроцессорных систем / В.Ф. Шаньгин, А.Е. Костин, В.М. Илющечкин, П.А. Тимофеев / Под ред. В.Ф. Шаньгина. – М.: Высшая школа, 1990. – 303 с.
96. Процеси самоорганізації в матеріалах різної природи: Навч. посіб. / А.П. Шпак, Ю.А. Куницький, В.А. Прокопенко, С.Ю. Смик. – К.: ІМ ім. Г.В. Курдюмова НАН України, 2004. – 113 с.
97. Рабочие поверхности и футеровки барабанных и вибрационных мельниц: Монография. / В.П. Франчук, В.А. Настоящий, А.Е. Маркелов, Е.Ф. Чижик. – Кременчуг: Изд-во Щербатых А.В., 2008. – 384 с.
98. Руководство по геофизической диагностике состояния системы «крепь – породный массив» вертикальных стволов / А.Ф. Булат, Алекс. А. Яланский, И.Г. Косков и др.: Донецк: ООО «Лебедь», 1999. – 42 с.
99. Светлицкий В.А. Случайные колебания механических систем. – 2-е изд., перераб. и доп. / В.А. Светлицкий. – М.: Машиностроение, 1991. – 320 с.
100. Селиванов М.Н. Качество измерений: Метрологическая справочная книга / М.Н. Селиванов, А.Э. Фридман, Ж.Ф. Кудряшова. – Л.: Лениздат, 1987. – 295 с.
101. Скучик Е. Основы акустики / Скучик Е.; пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – Т. 1. – 520 с. – Т. 2. – 542 с.
102. Слащов І.М. Обґрунтування параметрів підтримання підготовчих виробок в структурно-неоднорідних породах: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.15.02 “Підземна розробка родовищ корисних копалин” / І.М. Слащов. – Дніпропетровськ, 2009. – 20 с.
103. Слащова О.А. Розробка методики експрес-оцінки напружено-деформованого стану породного масиву навколо геотехнічних об’єктів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.15.11 “Фізичні процеси гірничого виробництва” / О.А. Слащова. – Дніпропетровськ, 2007. – 19 с.
104. Смирнов Б.М. Физика фрактальных кластеров / Б.М. Смирнов. – М.: Наука, 1991. – 136 с.
105. Советский энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М. Прохоров. – 2-е изд. – М.: «Советская энциклопедия», 1983. – 1560 с.
106. Современные проблемы механики горных пород: Материалы четвертой Всесоюзной конференции по механике горных пород. – М.: Наука, 1972. – 335 с.
107. Тарасевич Ю.Ю. Математическое и компьютерное моделирование: Вводный курс / Ю.Ю. Тарасевич. – М.: УРСС, 2002. – 144 с.
108. Ткачев В.В. Реализация быстрого преобразования Фурье методом двенадцати ординат с помощью однокристалльных микроконтроллеров В.В.Ткачев, Алекс. А. Яланский // Гірничя електромеханіка та автоматика. – Дніпропетровськ: НГАУ, 1999. – № 3 (62). – С. 61 – 67.
109. Томпсон Дж. М.Т. Неустойчивости и катастрофы в науке и технике / Томпсон Дж. М.Т.; пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 254 с.
110. Ультразвук в разведочном бурении / В.Т. Глушко, П.К. Кучеба, А.М. Куц, В.И. Хлыстов, А.А. Яланский. – Донецк: Донбасс, 1974. – 70 с.
111. Усаченко Б.М. Исследование синергетических и волновых процессов в массиве горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень / Б.М. Усаченко, Т.А. Паламарчук, Е.А. Слащева. – М.: МГГУ, 2000. – № 8. – С. 182-184.
112. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике / А.Б. Фадеев. – М.: Недра, 1987. – 221 с.
113. Федер Е. Фракталы / Федер Е.; пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
114. Федорков Б.Г. Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение / Б.Г. Федорков, В.А. Телец. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
115. Фелпс Р. 750 практических электронных схем: Справочное руководство. Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 584 с.

- 
116. Фергусон Дж. Обслуживание микропроцессорных систем: Пер. с англ. / Дж. Фергусон, Л. Макари, П. Уилльямс. – М.: Мир, 1989. – 336 с.
117. Фрадков А.Л. Кибернетическая физика: принципы и примеры / А.Л. Фрадков. – СПб.: Наука, 2003. – 208 с.
118. Фролов А.В. Библиотека системного программиста / А.В. Фролов, Г.В. Фролов. В 15 т. МИФИ. – М.: Диалог-МИФИ, 1994. Т. 15: Мультимедиа для Windows. Руководство для программиста. – 284 с.
119. Хаотические процессы в горных технических системах, особенности моделирования и контроля их устойчивости на основе генераторов динамического хаоса / А.А. Яланский, Алекс. А. Яланский, Н.А. Иконникова, В.В. Арестов, Т.И. Яровая // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2009. – № 83. – С. 194 – 205.
120. Цікра О.А. Розробка способів підвищення несучої здатності анкерного кріплення при рамно-анкерному підтриманні виробок у нестійких породах: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.15.02 “Підземна розробка родовищ корисних копалин” / О.А. Цікра. – Дніпропетровськ, 2010. – 20 с.
121. Цифровая обработка информации на основе быстродействующих БИС / С.А.Гамкрелидзе, А.В.Завьялов, П.П.Мальцев, В.Г.Соколов. Под ред. В.Г.Домрачева. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 136 с.
122. Чегринцев В.В. Спектральный индикатор / В.В. Чегринцев // РадиоАматор. – 1994. – № 4, с. 5-7.
123. Чуличков А.И. Математические модели нелинейной динамики / А.И. Чуликов.– 2-е изд., испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 296 с.
124. Шашенко А.Н. Некоторые задачи статистической геомеханики / А.Н. Шашенко, С.Б. Тулуб, Е.А. Сдвижкова. – К.: Університетське видавництво “Пульсари”, 2002. – 302 с.
125. Швецов М.С. Петрография осадочных пород / М.С. Швецов. – М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр, 1958. – 416 с.
126. Швець О.Ю. Детермінований хаос при коливаннях фізичного маятника / О.Ю. Швець // Наукові вісті НТУУ “КПІ”, 2006. – № 4. – С. 85 – 91.
127. Шерифф Р. Сейсморазведка: В 2-х т. / Шерифф Р., Гелдарт Л.; пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – Т. 1. История, теория и получение данных. – 448 с. – Т. 2. Обработка и интерпретация данных. – 400 с.
128. Яковлев Е.Л. Зарубежные микросхемы широкого применения / Е.Л. Яковлев // РадиоАматор. – 1995. – № 6. – С. 30.
129. Яланский А.А. Моделирование динамики хаотических и синергетических процессов в сложных системах / А.А. Яланский, Алекс. А. Яланский, Н.А. Иконникова // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2008. – № 78. – С. 163 – 172.
130. Яланский А.А. Особенности и диагностика процессов самоорганизации породного массива в окрестности горных выработок / А.А. Яланский, Т.А. Паламарчук, С.Н. Розумный // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГГУ, 2003. – № 3. – С.151-154.
131. Яланский А.А. Особенности изучения свойств и состояния массива горных пород ультразвуковыми методами на скважинах глубокого и сверхглубокого бурения / А.А. Яланский // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2010. – № 91. – С. 33-42.
132. Яланский Алекс. А. Приборно-методическое обеспечение оперативного автоматизированного контроля состояния электротехнических систем / А.А. Яланский, Н.А. Иконникова, В.В. Арестов // Збірник наукових праць національного гірничого університету № 31. – Дніпропетровськ: НГУ, 2008. – С. 173 – 182.
133. Яланский Алекс. А. Обобщенная структура универсальных микропроцессорных приборов автоматизированного геофизического контроля / Алекс. А. Яланский, В.В. Арестов // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2003. – № 42. – С. 62-67.
134. Яланський О. А. Тенологія та особливості розробки мікропроцесорних приладів і систем автоматизованого геофізичного контролю стану приконтурного масиву гірських порід та кріплення /

- О.А. Яланский, В.В. Арестов // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2003. – № 41. – С. 221-228.
135. Ямщиков В.С. Волновые процессы в массиве горных пород: Учебник для вузов / В.С. Ямщиков. – М.: Недра, 1984. – 271 с.
136. Ямщиков В.С. Контроль процессов горного производства: Учебник для вузов / В.С. Ямщиков. – М.: Недра, 1989. – 446 с.
146. Chen Haibo Center conditions and bifurcation of limit cycles at degenerate singular points in a quintic polynomial differential system / Chen Haibo, Liu Yirong, Zeng Xianwu // Bull. sci. math. — 2005. — 129. №2. — P. 127-138.
147. Cicogna G.J. Resonant bifurcation / G.J. Cicogna // Nonlinear Anal. Theory, Meth.and Appl. – 2000. – 241. №2. – P. 151-180.
148. Dimension of strange attractors. An experimental determination for the chaotic regime of two convective systems / Malraison B., Atten P., Berge P., Dubois M. // J. Phys. Lett. 1983. V. 44. P. 897 – 902.
149. Experimental Characterization of Transition to Chaos in the Presence of Noise / Xu B., Lai Y.-C., Zhu L., Do Y. // Phys. Rev. Lett. 2003. Vol.90. P. 164101-1 – 164101-4.
150. FT232BM USB UART (USB – Serial) I. C. DS232B Version 1.2 / Future Technology Devices Intl. Ltd., 2003. – 24 p.
151. Harb A.M. Conh-olling Hopf bifurcation and chaos in a small power system /A. M. Harb, N. Abdel-Jabbar // Chaos, Solitons and Fractals. – 2003. – № 18. – P. 1055-1063.
152. Harder P. Keeping big shovels producing // Mining Magazine. May 1997, p. 302.
153. Henon M. On the numerical computation of Poincare maps / M. Henon // Physica. 1982. V. D5, № 2, 3. P. 412 – 414.
154. Holmes P.J. Averaging and chaotic motions in forces oscillation / Holmes P.J. – SIAM J. Appl. Math., 1980, 38, p. 65.
155. Landa P.S. Changes in the dynamical behavior of nonlinear systems induced by noise / Landa P.S., McClintock P.V.E. // Physics Reports. 2000. Vol.323. P. 1-80.
156. Li T.-Y. Period Three Implies Chaos / Li T.-Y., Yorke J.A.// Amer. Math. Monthly. 1975. V. 82. P. 982-985.
157. Lorenz E.N. Deterministic non-periodic flow / Lorenz E.N. – Atmos Sciences, 1963, V. 20, P. 130. [Имеется перевод в сборнике статей: Странные аттракторы (ред. Я.Г. Синай и Л.П. Шильников). – М.: Мир, 1981].
158. Malick K. Stability analysis of noise-induced Hopf bifurcation / Malick K., Marcq P. // Eur. Phys.J. B. 2003. V. 36. P.119-128.
159. Ott E. Controlling Chaos / Ott E., Grebogi C., Yorke J.A. // Phys. Rev. Lett. 1990. V. 64. P.1196 – 1199.
160. Rossler O.E. Continuous chaos – prototype equations / Rossler O.E. – Annals, New York Academy of Sciences, 1979, 316, p. 3 76.
161. Rossler O.E. Chaos. – In Structural Stability in Physics / Rossler O.E. (eds W. Guttinger, H. Eikemeier) – Berlin: Springer, 1978, p. 290.
162. Ruelle D. On the nature of turbulence / Ruelle D., Takens F. – Comm. Math. Phys., 1971, V. 20. P. 167 – 192 . [Имеется перевод в сборнике статей: Странные аттракторы (ред. Я.Г. Синай и Л.П. Шильников).- М.: Мир, 1981].
163. Universal Serial Bus Specification Revision 2.0 /Compaq Computer Corp., Hewlett-Packard Company, Intel Corp., Lucent Technologies Inc, Microsoft Corporation, NEC Corp., Koninklijke Philips Electronics N.V., 2000. – 622 p.

Наукове видання

**Іконнікова** Наталія Анатоліївна  
**Корсун** Валерій Іванович  
**Слащов** Антон Ігорович  
**Яланський** Олексій Анатолійович  
**Яланський** Анатолій Олександрович

**МОДЕЛЮВАННЯ ТА КОНТРОЛЬ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ  
У ЗАДАЧАХ ОЦІНКИ СТАНУ ГЕОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ**

Монографія

(Російською мовою)

Друкується в редакційній обробці авторів

Підп. до друку 16.06.2015. Формат 30×42/4.  
Папір офсет. Ризографія. Ум. друк. арк. 15,5.  
Обл.-вид. арк. 15,5. Тираж 300 пр. Зам. №

Підготовлено до друку та видруковано  
у Державному ВНЗ «Національний гірничий університет».  
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842 від 11.06.2004.

49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.