

КЫРГЫЗСКО-РОССИЙСКИЙ СЛАВЯНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

П.И. ПАХОМОВ

**МЕТОДЫ
И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА
ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ
ЭКСПЛУАТАЦИИ
РУДНИЧНЫХ ПОДЪЕМОВ**

Бишкек 2000

УДК 622.67:622.8:621.876

П 12

Пахомов П.И.

Методы и технические средства повышения безопасности эксплуатации рудничных подъемов / Кыргызско-Российский Славянский университет. – Бишкек, 2000. – с.

ISBN 9967-405-44-9

Приведены основные методы анализа и прогнозирования травматизма и аварий на рудничных подъемных установках. Большое внимание уделено критическому анализу технических средств контроля аварийных параметров (превышения скорости, переподъема, застревания сосудов в стволе и др.).

Сформулированы и рассмотрены задачи синтеза технических средств контроля технологических и аварийных параметров с учетом требований эксплуатационной надежности и выполнения Правил безопасности.

Приведены методики расчета и выбора основных характеристик преобразователей угловых и линейных перемещений для аппаратуры контроля и защиты подъемов от аварийных режимов.

Рассмотрены схмотехнические решения узлов и блоков синтезируемой аппаратуры на современной элементной базе и ее связи с рабочим и предохранительным торможением во вновь проектируемых подъемах

Даны рекомендации по монтажу, настройке, наладке и эксплуатации разработанной аппаратуры с датчиками контроля безопасности на месте ее применения.

Приведены методики расчета экономической эффективности и оценки повышения безопасности эксплуатации подъемных установок при разработке и внедрении новых технических средств контроля и защиты.

Рассчитана на инженерно-технических работников научно-исследовательских, проектно-конструкторских и монтажно-наладочных организаций, заводов-изготовителей аппаратуры шахтной автоматики, специалистов, обеспечивающих эксплуатацию подъемных комплексов шахт и рудников, преподавателей и студентов горных специальностей.

Рецензенты: кафедра горной электромеханики Кыргызского
горно-металлургического института,
проф., д-р техн. наук К.И. Иванов.

Печатается по решению
кафедры
и РИСО КРСУ

ISBN 9967-405-44-9

© КРСУ, 2000 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	
Введение.....	
1. Состояние вопроса, задачи и методика исследования.....	
1.1. Анализ аварий на подъемных установках, связанных с движением сосудов.....	
1.2. Современное состояние средств защиты.....	
1.3. Пути повышения эффективности средств защиты.....	
1.4. Задачи и методика исследования.....	
2. Способы и средства непрерывного определения положения подъемных сосудов в шахтном стволе.....	
2.1. Анализ способов и устройств косвенного и непосредственного определения положения сосудов и требования, предъявляемые к ним.....	
2.2. Способы определения направления перемещения сосуда.....	
2.3. Расчет параметров элементов устройств.....	
Выводы.....	
3. Исследование и анализ параметров преобразователей перемещений подъемного сосуда.....	
3.1. Аналитическое исследование преобразователя перемещения сосуда с использованием неоднородных линий.....	
3.2. Влияние геометрических размеров неоднородностей на точность определения положения сосуда.....	
3.3. Расчет и исследование неоднородных линий на ЭВМ.....	
Выводы.....	
4. Экспериментальные исследования средств системы непрерывного определения положения подъемных сосудов.....	
4.1. Структура системы.....	
4.2. Схемы и конструктивные решения.....	
4.3. Стендовые испытания.....	
4.4. Аппаратурная реализация и исследование быстродействия.....	
Выводы.....	
5. Экономическая эффективность системы при внедрении в горную промышленность и оценка безопасности эксплуатации подъема.....	
5.1. Определение экономической эффективности.....	
5.2. Оценка повышения безопасности.....	
Выводы.....	
Заключение.....	

Список литературы.....	
Приложение 1.....	
Приложение 2.....	
Приложение 3.....	
Приложение 4.....	
Приложение 5.....	
Приложение 6.....	
Приложение 7.....	
Приложение 8.....	

ПРЕДИСЛОВИЕ

Развитие рудничных подъемных установок идет по пути увеличения высоты подъема, грузоподъемности и скорости движения сосудов /96/. В настоящее время высота подъема превысила 2000 м, грузоподъемность сосудов возросла до 100 т, максимальная скорость подъема достигла 20 м/с. Имеются установки, в клетки которых перевозится 150 человек, и разработаны клетки, которые вмещают 200 человек одновременно /61/.

В связи с этим значительно повысились требования, предъявляемые к современным автоматизированным подъемным установкам, в частности к средствам управления, контроля и защиты, для обеспечения высокоэффективной, надежной и безопасной эксплуатации. Существующие средства контроля и защиты подъемов от аварийных режимов, связанных с движением сосудов в стволе (переподъем, превышение скорости, застревание и заклинивание сосуда и др.) не всегда в полной мере выполняют свои функции, что приводит к тяжелым авариям и часто к гибели людей /28,29/. Требуется дальнейшее совершенствование всех средств повышения безопасности эксплуатации подъемных установок, в том числе аппаратов контроля и защиты.

К вопросам, связанным с контролем и защитой рудничных подъемов, относятся: уточнение требований к средствам контроля и защиты по мере совершенствования методов и средств предохранительного торможения, обеспечивающих безопасность подъемов; разработка методов и технических средств на их основе для непосредственного определения местоположения сосудов в стволе; совершенствование структуры построения многофункциональных средств контроля путем использования цифровых методов вычислительной техники; разработка совершенных преобразователей (датчиков) контроля безопасности, обеспечивающих выполнение указанных требований; определение показателей и обеспечение надежности средств контроля и защиты; разработка методов определения их неисправностей (техническая диагностика) и регламентов обслуживания.

Часть из этих вопросов на разных этапах развития подъема рассматривалась в /1...26/. В этих работах приведены в основном решения, сложившиеся применительно к тихоходным подъемным установкам.

В настоящее время положение существенно изменилось. Увеличение высоты подъема привело к росту поступательно перемещающихся масс и влиянию колебаний канатов. Возникла необходимость в более высокой точности контроля хода подъемных сосудов в стволе /70-73, 77,79-82/, с формированием и отображением информации о местоположении /70...73,77,79...82,92,93,101...103/, а также в снижении динамических напряжений в канатах при торможении /91,96/. Кроме этого, появилась необходимость в формировании команд по пути движения сосуда, программировании заданной скорости движения /101/ сосуда, формировании команд пуска и аварийной остановки из клетки /86/, формировании информации о направлении перемещения сосуда /72/.

Плодотворным является применение методов теории электромагнитного поля для синтеза преобразователей линейных перемещений, входящих в структуру информационно-измерительных систем средств контроля.

Практическим результатом применения методов радиотехники явилось создание быстродействующих и многофункциональных систем повышения безопасности эксплуатации подъемов /80...82/.

Основные направления развития технических средств контроля и защиты подъемов: повышение быстродействия, обеспечение многофункциональности, уменьшение габаритов и энергопотребления аппаратуры, повышение надежности. Развитие теории количественного прогнозирования уровня безопасности и теории надежности ведет к необходимости применения этих методов для оценки технических средств контроля и защиты на стадии разработки.

Многие из перечисленных вопросов частично рассмотрены в работах /4,9,10,12,17,18,20,23,24,30,31,36,41,42,45,46/, а также /70-74,79-82/. Однако разбросанность этих материалов по различным источникам делает затруднительным ознакомление с ними широкого круга специалистов.

В настоящей работе автор предпринял попытку систематизировать упомянутые вопросы с единых методологических позиций, чтобы приведенные материалы могли быть использованы и в будущем по мере совершенствования методов и технических решений при создании средств контроля и защиты рудничных подъемов от аварий, связанных с движением сосудов в стволе.

Самостоятельное значение имеет приложение 8. Здесь приведены подробные сведения по техническому описанию, монтажу, настройке, испытанию и эксплуатации индуктивной аппаратуры КОНТУР с датчиками контроля безопасности на действующей подъемной установке.

Автор считает своим долгом выразить свою признательность академику НАН КР А.В. Фролову за ценные замечания, сделанные при редактировании работы и член-корреспонденту НАН КР В.И. Нифадьеву за помощь и содействие в ее издании.

А также автор выражает большую благодарность коллегам по совместной работе, коллективу кафедры горной электромеханики Кыргызского горно-металлургического института, и всем сотрудникам, принимавшим участие в подготовке и издании настоящей монографии.

ВВЕДЕНИЕ

Главные задачи дальнейшего повышения роста добычи угля и руд черных и цветных металлов и эффективности развития экономики горной промышленности - опережающими темпами развивать рудную базу /28,29,41,95/.

Решение поставленных задач тесно связано с кардинальным повышением технического уровня горнодобывающей отрасли, ростом комплексно-механизированных и автоматизированных шахт и рудников, внедрением высокоэффективных горных машин, разработкой и широким использованием систем автоматического контроля технологических и аварийных параметров на базе современных средств электронной, измерительной и вычислительной техники.

В общем транспортном потоке выдачи полезного ископаемого шахт и рудников подъемные установки являются наиболее сложными и ответственными электромеханическими объектами горных предприятий. Сложность и особая ответственность функционирования этих объектов связана с необходимостью обеспечения высокого уровня надежности и безопасности эксплуатации подъемных машин, поскольку отказ их механических и электрических узлов может привести не только к большим потерям, вызванным простоем всего предприятия, но и к травмированию людей. Так, по данным /29/, травматизм при эксплуатации внутришахтного транспорта и подъемных установок остается высоким и составляет 25% от всех случаев на подземных работах горнорудной и нерудной промышленности, при этом из общего числа смертельных случаев на подземном транспорте и подъемах 71% приходится на транспорт и 29% – на подъем. В связи с этим дальнейшая интенсификация работ наряду с применением высокопроизводительных машин требует совершенствования средств повышения безопасности эксплуатации подъемных установок.

Основой для повышения эффективности и безопасности эксплуатации рудничного подъема является его теория и практика. Фундаментальные труды в области теории и практики рудничного подъема академиков М.М. Федорова и А.П. Германа получили свое развитие в работах академиков Г.Н. Савина, чл.-корр. А.С. Ильичева, профессоров Б.Б. Уманского, Ф.Н. Шклярского, Г.М. Еланчика, В.С. Тулина. Дальнейший вклад в развитие теории и практики рудничного подъема внесли К.М. Барамидзе, В.Д. Белый, П.П. Нестеров, З.М. Федорова, Ф.В. Флоринский, А.Е. Троп, Е.С. Траубе, Ю.Г. Киричок, В.М. Черманых, Б.А. Носырев, Г.В. Верстаков, А.Г. Степанов, С.М. Кубарев, А.Н. Шатило, В.Е. Католиков, Д.Д. Динкель, А.А. Белоцерковский, В.И. Дворников, В.А. Макаров, Э.С. Лапин и др. На базе созданной современной теории рудничного подъема разработаны эффективные подъемные установки и требования их безопасной эксплуатации.

В настоящее время для обеспечения эффективной и безопасной эксплуатации рудничного подъема в структуре его оборудования большое внимание уделяется аппаратным средствам управления, контроля, защиты, сигнализации и связи /1,2,9,10,12,25,26,36,49,62,65,70-74,77, 79,80-82,86,92,93,102/. В последние годы разработаны достаточно надежные средства связи, в том числе с совмещением функций контроля напуска и управления подъемной машиной из клетки /45,46,86/. Применение в устройствах косвенных и непосредственных способов с использованием записи магнитных меток на канате способствовало осуществлению непрерывного контроля и защиты от зависания сосудов, от проскальзывания и переползания канатов на одноканатных и многоканатных подъемных установках /12,92,93/. На основе контактных и бесконтактных логических структур созданы устройства программирования и контроля хода подъемных машин, реализующих алгоритм управления и защиты методами цифровой вычислительной техники /13,41,42,101/.

Вместе с тем в последнее время из-за объективной необходимости увеличения глубины шахтных стволов, грузоподъемности подъемных сосудов, скорости движения и высокой точности останковки подъемных сосудов в стволе значительно возросли требования к средствам управления, контроля и защиты, призванных обеспечивать производительную, надежную и безопасную эксплуатацию подъемных установок.

Несмотря на известные достижения в разработке технических средств, в настоящее время практически отсутствуют соответствующие автоматические системы, выполненные на их основе, способные наиболее полно удовлетворить возросшим требованиям /34,63,72,79/.

Существующая тенденция к решению лишь некоторых отдельно взятых, хотя и важных вопросов контроля и управления, сигнализации и связи, сопряженных с движением подъемных сосудов, приводит к значительному росту номенклатуры разрабатываемой аппаратуры и возникновению проблемы совместимости при работе в условиях одной подъемной установки /36,45,46,86/. Отсутствие комплексного, системного подхода к решению указанных задач приводит также к проблемам информационной, конструктивной, энергетической, эксплуатационной и эргономической совместимости /71,73,90/. Известно также, что получение и обработка информации о местоположении подъемных сосудов при помощи соответствующих технических средств является основным содержанием процесса управления подъемной машиной в технологических и аварийных режимах /41,62,91,96,101,103/. Следовательно, комплексный подход к проблеме создания системы, отвечающий возрос-

шим требованиям эффективной и безопасной эксплуатации подъемных установок, без указанных технических средств невозможен.

В настоящее время широко известные разработки средств отбора путевой информации основаны на записи магнитных меток на головном или специальном канате, подвешенном в стволе, который одновременно выполняет функцию линии связи между подъемным сосудом и машинным отделением для передачи дискретных сигналов о пути /12,55,92, 102/.

Однако ряд существенных и принципиально неустраняемых недостатков, характерных для устройств с магнитной записью, не позволяет применять их в качестве основы для вновь разрабатываемых систем /71,82/.

Так, в силу специфики работы устройств отбора информации о пути не выполняются требования Правил безопасности /34/, поскольку специальный канат с нанесенными магнитными метками не закрепляется по стволу и имеет контактную механическую связь с движущимся сосудом посредством считывающего магнитные метки тороидального датчика. Кроме того, возможна потеря носителей информации - магнитных меток, из-за самопроизвольного размагничивания участков каната или размагничивания в электромагнитном поле, например, при сварочных работах в стволе /82/.

Эти обстоятельства могут вызвать несрабатывание или ложное срабатывание тормозного устройства подъемной машины. При этом в неблагоприятных случаях динамические нагрузки, создаваемые предохранительным торможением, отрицательно повлияют не только на работоспособность и надежность электромеханического комплекса подъема, но и на безопасность эксплуатации, так как могут вызвать разрушение отдельных элементов, набегание подъемного сосуда на канат, проскальзывание каната по шкиву трения, формирование недопустимых амплитуд замедлений и т.д. /44,91,99/.

Таким образом, создание эффективных и надежных средств непрерывного определения пути, проходящего подъемным сосудом, является важной задачей, имеющей как самостоятельное значение, так и определяющей функциональные возможности устройств защиты от переподъема, защиту от превышения скорости, дифференцированную по пути максимальную защиту, защиту от застревания сосуда в стволе и т.п. Как самостоятельная система непрерывного определения положения подъемных сосудов в стволе шахты осуществляет отбор путевых команд в заданных точках ствола, формирование и индикацию параметров движения сосудов, формирование задающих сигналов для систем авторегулирования скорости и др./7,11,37,48,66,72,84,91,107-109/.

Значимость такой системы возрастает с увеличением глубины ствола шахты и необходимостью применения многорежимных подъемов, связывающих между собой различные горизонты при разных значениях установившихся скоростей, ускорений, рывков.

Для решения этой задачи необходимо разработать единую систему, содержащую в своей основе устройства для определения положения подъемных сосудов, выполненную с учетом принципов конструктивного агрегатирования с широким применением средств и методов радиоэлектроники и вычислительной техники /71/. Это позволит создать реальные предпосылки для условий эффективной и безопасной эксплуатации подъемных установок, с учетом возросших требований к разрабатываемой системе и выполнению требований Правил безопасности /34,70,71,79,81,82/.

Целью работы является повышение безопасности эксплуатации рудничных подъемных установок путем создания эффективных средств защиты от аварийных режимов (переподъема, превышения скорости, напуска каната) на основе непрерывного определения положения сосудов и ее связи с рабочим и предохранительным торможением во вновь проектируемых подъемах.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЗАДАЧИ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Современное горнодобывающее предприятие, кроме высокой технико-экономической эффективности должно обладать и высокой социальной эффективностью, одним из основных факторов которой является безопасность труда работающих /7,37,48,68,71, 72,75,79/. До последнего времени отсутствовали методы количественного прогнозирования уровня безопасности труда на стадии разработки технических средств, направленных на повышение безопасности эксплуатации горных машин и комплексов, в том числе и рудничных подъемных установок. Актуальность создания таких методов определялась, прежде всего, высокой опасностью горнодобывающего производства и связанным с ней травматизмом, а также тем обстоятельством, что внедрение механизации и автоматизации производственных процессов в шахтах, концентрации и интенсификации горных работ не всегда давали ожидаемые результаты по снижению травматизма.

В настоящее время благодаря исследованиям, проведенным в МГИ, МакНИИ, ВостНИИ и других организациях, разработаны методы анализа травматизма и прогнозирования уровня безопасности труда, основанные на представлении о травматизме как о случайном процессе и его вероятностном описании, позволяющие получать количественную оценку условий безопасности.

Для травматизма как причинно обусловленного явления характерно случайное сочетание отдельных определяющих факторов. Это позволяет рассматривать травматизм как явление случайное и использовать для его анализа методы математической статистики и теорию вероятностей. Статистические характеристики определяют некоторые средние показатели травматизма путем обобщения и обработки по определенным законам сведений о большом числе несчастных случаев за достаточно продолжительный период времени. Вероятностные характеристики травматизма определяют вероятность тех или иных событий, связанных с травматизмом, к числу которых относятся, например, вероятность травмирования трудящегося в данной производственной ситуации, вероятность безотказной работы различных защитных устройств, вероятность аварийных ситуаций /7,17,22,24,31,75,85,88,94,97/. Вероятностные характеристики обычно определяются путем анализа имеющегося статистического материала о травматизме или авариях /88/.

В современных методах анализа травматизма (аварий) используют также теорию надежности /22,24,31,97/, так как несчастные случаи часто самым тесным образом бывают связаны с отказами или авариями в механических и электрических системах.

Все существующие методы анализа травматизма (аварий) делятся на три основные группы: технические, статистические и вероятностные /68/.

Целью технического анализа травматизма является установление причин и взаимосвязи технических факторов, приведших к несчастному случаю, и разработка технических рекомендаций по их предупреждению в будущем. Технический анализ прежде всего устанавливает качественную картину развития событий при несчастном случае (аварии). Следующим этапом технического анализа является количественная оценка определяющих факторов, так как только на ее основе можно дать конкретные технические рекомендации по улучшению защиты. Статистические методы анализа травматизма базируются на статистическом материале о несчастных случаях и прежде всего на актах и результатах расследований. Целью статистических методов анализа является обобщенная оценка степени безопасности существующих условий труда на участке, шахте и в отрасли. Статистический анализ травматизма (аварий) в свою очередь делится на табличный, по коэффициентам травматизма, корреляционный и др.

Табличный анализ травматизма (аварий) заключается в группировании несчастных случаев по тем или иным показателям в виде таблицы, при этом в качестве группирующих показателей может применяться тяжесть травм, причины и места травматизма в шахтах, вид механизации и автоматизации, время. Табличный анализ позволяет установить наиболее опасные причины, факторы, места травматизма, а также изменение их удельного веса во времени. Анализ по коэффициентам травматизма заключается в анализе условий безопасности труда по статистическим критериям - коэффициенту частоты, коэффициенту тяжести травматизма, показателю опасности и т.п. Анализ динамики и сравнительный анализ травматизма производится путем определения коэффициента травматизма за последовательные промежутки времени и сопоставления полученных значений. Корреляционный анализ травматизма (аварий) базируется на общих методах корреляционного анализа и используется для установления количественных зависимостей между показателями травматизма и определяющими травматизм факторами. Поскольку сам травматизм, как и определяющие его факторы – величины случайные, то зависимость между ними не является однозначной, а имеет статистический, усредненный характер. Следовательно, фактическое значение показателя травматизма при принятых значениях корреляционных факторов может отличаться от его значения, рассчитанного по установленной зависимости. Это расхождение будет тем больше, чем менее взаимосвязаны определяющие факторы и показатель травматизма, степень связи между которыми характеризуется коэффициентом корреляции этих величин, а для случая нелинейной связи – корреляционным отношением. Чем больше по абсолютной величине коэффициент корреляции (в пределах плюс, минус

единица), тем более взаимосвязаны соответствующие случайные величины. При коэффициенте корреляции, равном единице, зависимость полностью детерминирована, в противном случае связь отсутствует. Показателем, наиболее часто используемым при корреляционном анализе, является интенсивность травматизма (аварий). Она равна числу несчастных случаев, приходящихся в единицу времени. В практике анализа травматизма используется как парная корреляция, устанавливающая зависимость интенсивности травматизма от какого-либо одного фактора, так и множественная корреляция, - при установлении общей зависимости показателя травматизма от всех определяющих факторов. В результате обработки статистических данных о травматизме (авариях) по полученным средним значениям интенсивности травматизма от определяющего фактора строится график зависимости. По виду графической зависимости, с использованием метода наименьших квадратов /5,47,53/, получают ее уравнение. При корреляционном анализе определяются также характеристики рассеивания функции и степень взаимозависимости случайных величин, при этом для оценки используется следующий математический аппарат /4,17,83,88/:

$$\tilde{m}_l = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{li}, \quad (l=1, \dots, m); \quad (1.1)$$

$$\tilde{D}_l = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{li} - \tilde{m}_l)^2, \quad (l=1, \dots, m); \quad (1.2)$$

$$\tilde{K}_{lj} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{li} - \tilde{m}_l)(x_{ij} - \tilde{m}_j), \quad (l=1, \dots, m; j=1, \dots, m); \quad (1.3)$$

$$r_{lj} = \frac{\tilde{K}_{lj}}{\tilde{\delta}_l \cdot \tilde{\delta}_j}, \quad (l=1, \dots, m; j=1, \dots, m), \quad (1.4)$$

где \tilde{m}_l - математическое ожидание случайной величины по столбцам таблицы наблюдений; x_{li} - результат наблюдения или значение, принятое случайной величиной x_i в l -м опыте (по столбцу); x_{ij} - результат наблюдения x_i в j -м опыте (по строке); l, j - индекс - номер наблюдения; i - индекс - номер случайной величины; m - число значений, принятых случайными величинами в строке таблицы; n - число наблюдений случайных величин (опытов) по столбцу таблицы; \tilde{D}_l - дисперсия случайных величин (по столбцам); \tilde{K}_{lj} - корреляционные моменты между случайными величинами; r_{lj} - элементы нормированной корреляционной матрицы; $\tilde{\delta}_l, \tilde{\delta}_j$ - средние квадратические отклонения (по столбцам l -му и j -му). Нормированная корреляционная матрица для определения степени взаимосвязи случайных величин и влияния их друг на друга имеет вид

$$r = \begin{Bmatrix} 1 & r_{12} & & & \\ & 1 & r_{23} & \dots & r_{2m} \\ & & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & & \cdot & \cdot \\ & & & & 1 \end{Bmatrix}, \quad (1.5)$$

где $r_{jj} = 1$ - коэффициент корреляции x_i с самой собой при $l = j$.

Вероятностный метод анализа травматизма (аварий) для оценки безопасности труда использует понятие вероятности и аппарат теории вероятностей /17,83,88/. В его основе лежит представление о травматизме (аварии) как о случайном процессе, имеющем свои причины, проявление которых происходит в виде действия множества факторов. Использование вероятностных методов при анализе травматизма /68/ позволяет дать количественную оценку степени случайности появления травмы (аварии). Вероятностный метод анализа травматизма базируется на исходных статистических данных. При вероятностном методе анализа травматизма используют ряд вероятностных характеристик: интенсивность травматизма, тяжесть травматизма, вероятность наступления несчастного случая (аварии). Исследование травматизма в шахтах показывает /68/, что с достаточной для практических выводов точностью его распределение подчиняется закону Пуассона, согласно которому вероятность того, что за период Δt произойдет m несчастных случаев

$$P_m = \frac{a^m}{m!} \exp(-a), \quad (1.6)$$

где a - параметр закона Пуассона, зависящий от интенсивности травматизма λ ;

$$a = \int_t^{t+\Delta t} \lambda dt, \quad t - \text{время} \quad (1.7)$$

Для стационарного характера травматизма $\lambda = \text{const}$, при этом

$$a = \lambda \Delta t \quad (1.8)$$

Вероятность того, что в данных условиях произойдет хотя бы один (или более) несчастный случай

$$p = 1 - \exp(-a). \quad (1.9)$$

Если известна вероятность несчастного случая p , то вероятность работы без травм (аварии)

$$q = 1 - p \quad (1.10)$$

Опасная (аварийная) ситуация рассматривается как опасное сочетание факторов окружающей среды при одновременном отказе защитного экрана /68/. Под защитным экраном подразумеваются любые защитные приспособления, охраняющие человека (машину, установку) от опасного воздействия окружающей среды: заземление, крепление, защита и т.д.

Общая вероятность несчастного случая равна произведению частных вероятностей /17/

$$P_o = \prod_{i=1}^m P_i, \quad (1.11)$$

где i – порядковый номер; m – общее число; P_i – частная i -ая вероятность (вероятность опасного сочетания факторов окружающей среды, вероятность отказа защитного экрана, вероятность появления человека в опасной зоне и т.п.). Вероятность травматизма (аварии) рассчитывается по статистическим данным о расследовании несчастных случаев (формулы (1.6)...(1.11)), при этом предварительно устанавливается интенсивность травматизма с использованием корреляционного метода. Важнейшим показателем качества любого защитного экрана является его надежность /94/, т.е. способность выполнения с высокой вероятностью заданных функций в нужное время и в нужном объеме /24,31,97/. Общие требования к надежности защитного экрана устанавливаются с учетом назначения, условий эксплуатации и последствий его отказов, при этом последние оцениваются количественно, с точки зрения экономического ущерба от аварии или с точки зрения ущерба безопасности людей. Повышение технической эффективности средств защитного экрана связано с увеличением числа образующих его компонентов и, как следствие, с уменьшением его надежности. В соответствии с теорией надежности /22,24,31,94/, если устройство (защитный экран) компонуется из условно долговечных элементов, отказывающихся по экспоненциальному закону, то отказы устройства в целом также подчиняются экспоненциальному закону /22/. При этом предполагается, что физические параметры структуры элементов устройства, влияющие на их надежность, не коррелированы. Отказы устройства независимы и наступают внезапно, в момент отказа слабейшего элемента в схеме. Вероятность безотказной работы устройства за время t , суммарная интенсивность отказов и время безотказной работы устройства определяются выражениями /24,97/:

$$P_{\Sigma}(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) = \exp(-\lambda_{\Sigma} t). \quad (1.12)$$

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \lambda_i = \sum_{i=1}^m N_i \cdot \lambda_i. \quad (1.13)$$

$$T = \lambda_{\Sigma}^{-1}, \quad (1.14)$$

где N_i – число элементов в группе подобных; λ_i – интенсивность отказов элементов i -й группы; N – общее число элементов, учитываемых при расчете; m – число групп подобных элементов. Результаты расчета сводятся в таблицы установленной формы, удобные для анализа и применения /94/.

Используя корреляционные зависимости для интенсивности травматизма (аварий), можно, варьируя входящие в них факторы, определить такие их значения, при которых вероятность травматизма (аварии) будет ниже фактической, находится на уровне или ниже уровня лучших по безопасности подъемных установок.

1.1. Анализ аварий на подъемных установках, связанных с движением сосудов

Наиболее полные и уникальные сведения по авариям на подъемах с начала текущего столетия до 70-х годов приведены в исследовании зарубежных авторов /43/. В соответствии с этапами этой работы проанализируем аварийные ситуации и несчастные случаи в стволах шахт в прошлом.

Первая четверть столетия характеризуется повышением добычи полезных ископаемых, увеличением количества работающих под землей и пропорциональным возрастанием числа лиц смертельно и тяжело травмированных в шахтных авариях всех видов. За пять лет, непосредственно предшествовавших войне 1914-1918 гг., было смертельно и тяжело травмировано 439 и 990 человек /43/. Из них непосредственно на шахтах, подъемных установках было смертельно травмировано 48 человек и 466 травмировано тяжело, при этом 18 и 11 человек травмировано соответственно смертельно и тяжело при обрывах канатов и подвесных устройств. Со временем число несчастных случаев, происходящих ежегодно, имело тенденцию к снижению вследствие уменьшения количества работающих шахт и подземных рабочих, прогрессивной замены паровых приводов на электрический, совершенствования подъемных машин, их тормозных устройств, защитной аппаратуры и оборудования и значительного улучшения методов инспекции, контроля и обслуживания.

В результате одни виды аварий были буквально изжиты, в то время как другие все еще устойчиво сохраняются. К первым, в частности, относятся обрывы канатов и прицепных устройств, что было обусловлено улучшением технологии производства этого оборудования, поддержанием в хорошем состоянии ствольных направляющих и высоким уровнем контроля канатов, связанным с установлением максимального срока службы. Таким образом, начиная с 1943 г., ни один человек не был смертельно травмирован от обрыва каната или разрушения элементов подвесных устройств.

Вплоть до 1950 г. разрушение прицепных устройств, их отдельных элементов было причиной множества падений в ствол подъемных сосудов при транспортировании грузов. Эти узлы в течение некоторого времени изготовлялись из ковкой мягкой стали. Начиная с этого времени, быстрое и широкое внедрение марганцевой стали и позднее легированной хромоникелевой молибденовой стали ликвидировали эти аварии.

В годы, непосредственно следующие за 1950 г., когда шахты впервые начали инспектироваться профессионально подготовленными горными инспекторами, многие подъемные машины эксплуатировались, не имея совершенных тормозов и эффективных указателей положения подъемных сосудов в стволе.

В это время защита от переподъема и превышения скорости применялась не на всех подъемах, а там, где применялась, находилась в зачаточном состоянии. Однако необходимость некоторой защиты в пределах приемных площадок начала признаваться и правила безопасности 1887 г. в точности предвещали современные требования в отношении посадочной скорости, глася следующее: "...если в любой шахте подъемные установки не обеспечены автоматическими устройствами, предотвращающими переподъем клетки при доставке людей, скорость подхода клетей к приемным площадкам не должна превышать 3 мили в час, когда клеть достигает точки в стволе, зафиксированной специальными правилами" /43/.

Впервые предложенная конструкция автоматического устройства Вайзора была изготовлена Вайгенским объединением угля и стали в 1888 г. и установлена на одной из шахт объединения лишь спустя 15 лет после этого, появилось более совершенное устройство – "контроллер Витмора" /43/.

В последующие годы было сконструировано и улучшено большое количество устройств безопасности, но по сравнению с современными их можно считать неточными, малочувствительными и несовершенными. Впоследствии аварии на подъемах продолжали иметь место, незначительно изменив свой характер, пока в 1932 г. авария в Бикершоу (рис.1.1), при которой погибло 19 человек, когда опускавшийся сосуд с людьми был перепущен в зумпф, наполненный водой, заставила правительственный комитет расследовать и вменить в обязанность меры предосторожности против переподъема /43/. Его доклад был опубликован в 1935 году и содержал две главные рекомендации, касающиеся минимального тормозного усилия и допустимого значения посадочной скорости, при которых автоматические устройства должны включаться в работу. Эти требования были приняты и узаконены в 1937 г.

Но прошло еще 10 лет, прежде чем автоматические устройства были соответствующим образом модифицированы или разработаны новые, а более эффективные устройства могли быть сконструированы и установлены на шахтах в достаточном количестве, чтобы оказать реальное влияние на аварии. Множество требований, относящихся к подъемной машине, тормозам и безопасной эксплуатации автоматических устройств, а также методам, которыми оборудование может регулярно контролироваться, не могло быть полностью оценено и сопоставлено вплоть до 1944 г., когда, наконец, Крук /43/ впервые создал детальное и логичное приближение к проблеме переподъема.

С этого времени отмечается снижение серьезных аварий из-за переподъема сосудов. Однако шахтный подъем и по настоящее время остался принципиальной причиной шахтных аварий. Число смертельных и тяжелых травм за последние 60 лет за рубежом показано на рис.1.1, а главные катастрофы из-за переподъема – в табл.1.1 /43/.

Таблица 1.1

Главные катастрофы из-за переподъема

Год	Шахта	Число смертельно травмированных	% от общего числа	Число травмированных	% от общего числа	Общее число несчастных случаев	% от общего числа
1909	Силвервуд	-	-	29	12,6	29	10,6
1926	Вест Арделей	2	4,7	14	6,1	16	5,8
1932	Бикершоу	19	44,2	1	0,4	20	7,3
1934	Полмайс	2	4,7	11	4,7	13	4,8
1939	Килинхарст	1	2,3	17	7,4	18	6,6
1939	Хайтфилд	1	2,3	70	30,3	71	25,9
1958	Брукхауз	-	-	36	15,6	36	13,1
1973	Маркхем	18	41,8	11	4,7	29	10,6
Всего:		43	100	231	100	274	100

Приводимые данные, как отмечают авторы /43/, в недостаточной мере отражают потенциальную опасность переподъема, так как на рис.1.1 и в табл.1.1 зарегистрированы только те аварии, которые вызвали серьезные травмы, в то время как существуют многочисленные случаи переподъема, близкие к авариям (табл.1.2). В последнем случае /43/, "переподъемом" назван или чрезмерный подъем, достаточный, чтобы вызвать вход подъемного сосуда в ограничивающее устройство копровой фермы, или подъем, приводимый к расцеплению с канатом или жесткой посадкой подъемного сосуда при опускании со скоростью, которая может привести к травмам людей. При незначительных отличиях в сопутствующих авариям обстоятельствах каждый из переподъемов (табл.1.2) при транспортировке людей мог сопровождаться значительно более серьезными последствиями.

Таблица 1.2

Количество переподъемов на шахтах

Год	Общее количество переподъемов			Количество переподъемов при перевозке людей			Переподъемов всего
	барабанный подъем	фрикционный подъем	подъем вообще	барабанный подъем	фрикционный подъем	подъем вообще	
1965	6	2	8	1	-	1	9
1966	4	4	8	-	-	-	8
1967	9	4	13	4	-	4	17
1968	6	4	10	-	-	-	10
1969	3	3	6	1	1	2	8
1970	7	6	13	3	-	3	16
1971	4	2	6	1	-	1	7
1972	1	4	5	-	-	-	5
1973	4	1	5	1	1	2	7
1974	3	-	3	1	-	1	4

За последние годы в результате принятых мер состояние техники безопасности при эксплуатации внутришахтного транспорта и подъемных установок на большинстве предприятий улучшилось, повысился уровень профилактической работы по созданию безопасных условий труда, разработаны и внедрены эффективные средства защиты от аварий /12,13,18,20,28,29,38,45,46,49,55,61,64,76,82,92,93,101/. Вместе с тем, в целом травматизм на подземном транспорте и подъемах остается высоким /29/, рис.1.2.

Серьезные недостатки в состоянии техники безопасности имеют место при эксплуатации подъемных установок, где 50% несчастных случаев связано с грузоподъемными подъемами и 45% - с бадьевыми /29/. Основными причинами смертельного травматизма в стволах являются работа по обмену вагонеток в клетях с открытыми предохранительными дверями на горизонте и уменьшенной деблокировкой средств защиты – 43%, падение зависшей рамки и обрыв каната бадьевого подъема – 21%, другие виды аварий, в том числе из-за переподъема и превышения скорости – 36%, рис.1.3. К сожалению, имеющаяся статистика не позволяет более детально анализировать другие случаи аварий в стволах шахт, которые имели место при подъеме людей.

Расследование аварий и несчастных случаев на подъемных установках показывает /28,29,63,64/, что они происходят главным образом из-за нарушений технологической дисциплины, потери бдительности среди работающих на стволах, неудовлетворительной организации работ, ослабления надзора и несоблюдения элементарных требований правил безопасности, отсутствия эффективных средств технологической автоматизации, защиты, блокировки, сигнализации, диагностики состояния оборудования.

Систематический анализ аварий и несчастных случаев на подъемных установках, имевших место при доставке людей, полезных ископаемых, материалов и оборудования, приведен в работах /28,29,43,49, 82/. На основании результатов этих работ главные составляющие аварий и несчастных случаев, связанных с движением подъемных сосудов, можно характеризовать следующими категориями:

- разрушение канатов и подвесных устройств;
- неожиданное смещение сосуда на посадочных площадках;
- избыточные величины замедления или случайное ослабление канатов, или застревание в стволе;
- переподъем и превышение скорости.

Проанализируйте кратко каждую из категорий данной классификации.

Разрушение канатов или подвесных устройств. Согласно /43/ за период 1942...1974 гг. за рубежом не было травмировано ни одного человека из-за разрушения канатов или прицепных устройств главным образом благодаря высокому уровню контроля и обслуживания, при котором разрушение четко определялось задолго до аварийной ситуации. Достижение этого результата обусловлено тем, что в основном применялись визуальные методы контроля, которые тесно связаны с компетенцией и бдительностью технического персонала. Тем не менее, 7 августа 1984 г. в стволе РЭШ-1 Холстинского рудника Садонского свинцово-цинкового комбината при аварии на подъеме произошел групповой несчастный случай /64,63/. В результате обрыва подъемного каната и свободного падения клетки на посадочные брусья горизонта № 7 были смертельно травмированы находившиеся в ней 5 человек.

Расследованием комиссии Госгортехнадзора СССР и Министерства цветной металлургии СССР установлено, что причиной аварии являются разрыв подъемного каната из-за потери его несущей способности в результате износа и повышенной коррозии, а также отказ парашютного устройства клетки вследствие его полной неработоспособности.

По заключению экспертной комиссии на момент аварии участок каната на грузоподъемной установке шахты РЭШ-1 длиной 220 м, который при эксплуатации находился в непосредственном контакте с направляющим шкивом, имел многочисленные порывы проволок, количество которых превышало норму, а в районе обрыва каната число оборванных проволок на одном шаге свивки составляло 30% от общего числа проволок при норме 5%. Конструктивные элементы парашютного устройства клетки из-за многочисленных дефектов (пружина разломана на семь частей, кулаки насажены на вал без шпонок) находились в неработоспособном состоянии и не могли обеспечить свои функции. Обрыв подъемного каната и отказ парашютного устройства клетки являются следствием невыполнения должностными лицами рудника обязательных требований Единых правил безопасности /34/ в части строжайшего проведения тщательного профилактического осмотра и ремонта /58/, смазки и испытания подъемных канатов и парашютных устройств клетки. Следует также отметить, что раз-

работка электромагнитного оборудования для контроля канатов /38/ продолжает оставаться узким местом для многих подъемных установок из-за сложности технической реализации непрерывного контроля разрушения канатов, особенно закрытой конструкции, в процессе эксплуатации. В то же время разработка средств непрерывного контроля состояния и целостности пружины парашютного устройства находится пока в стадии разработки /74,82/. Дополнительная сложность технической реализации указанных видов контроля заключается также в необходимости точного определения места начального разрушения головного каната и пружины парашюта, что в свою очередь тесно связано с непрерывным и однозначным определением положения сосудов в стволе.

Неожиданное смещение подъемных сосудов. Инциденты из-за внезапного смещения подъемных сосудов связаны с неисправностью сигнализации или ошибками людей. На некоторых шахтах, оборудованных многоэтажными клетями и простыми сигнальными аппаратами, опасность ошибочного сигнала увеличивается из-за присутствия на приемных площадках помощников рукоятчиков и других лиц /43/. К наиболее часто повторяющимся относятся случаи падения в ствол рабочих, занятых на операциях по обмену вагонов на клетевых подъемниках. Так, на шахте "Капитальная" Турьинского рудника Красноуральского медькомбината в момент ухода клетки с отметки горизонта в зумпфовую часть ствола вместе с груженым вагоном упал подкатчик. Подобные несчастные случаи произошли на рудниках "Акбакай" комбината "Алтайзолото" и им.Джамбула Акчатауского ГОКа Минцветмета Казахской ССР /29/. Совершенная аппаратура сигнализации совместно со средствами непосредственного определения местоположения сосуда в стволе будут способствовать исключению указанных инцидентов /70/.

Избыточное замедление. В тех случаях, когда люди травмируются при экстренном торможении машины предохранительным тормозом, необходимо отметить два фактора, оказывающих влияние на высокую величину замедления и последующие колебания сосуда /43,91,99/. Во-первых, тормоза должны быть достаточно мощными не только для точной остановки сосудов в пределах установленной Правилами безопасности /34/ высоты переподема, но и для того, чтобы иметь при этом определенный запас тормозного усилия. Во-вторых, учитывая возможность уменьшения чувствительности автоматических устройств и большого времени торможения, степень замедления заведомо должна быть выбрана выше, чтобы противостоять возможному влиянию таких факторов, как затяжной разгон в неверном направлении и гарантия необходимой посадочной скорости. Высокая степень торможения, в свою очередь, неизменно вызывает в упругой канатной системе значительные продольные колебания, и даже если они снижаются соответствующей регулировкой тормозного привода, тем не менее, люди подвергаются серьезным неудобствам при внезапном торможении. Значительные амплитуды колебаний подъемных сосудов в глубоких стволах /102/ вызывают неудобства и опасность травмирования в тем большей мере, чем глубже ствол при одних и тех же параметрах торможения /43/. Ударная нагрузка, испытываемая людьми, при опускании сосуда на ослабленный канат лишь незначительно меньше, чем при жесткой посадке на балки или подклетевые кулаки, однако это дополнительно связано с риском повреждения каната или деталей подвесного устройства. В связи с этим на многих шахтах подклетевые кулаки удалены и заменены блокировкой привода тормоза подъемной машины. Эта мера привела не только к снижению возможности образования ослабления каната, но также и снижению опасности случайного перемещения подъемного сосуда /43/.

На предприятиях горнодобывающей отрасли имели место аварии, связанные с внезапной остановкой сосуда. 3 ноября 1979 г. на грузоподъемном подъеме шахты "Энгельсовская" производственного объединения "Краснодонец" произошла авария – резкая остановка движущейся вниз клетки, вследствие заклинивания ее в обмерзших проводниках, с последующим срабатыванием парашютного устройства. Несколько человек травмировано в клетке. Из-за ликвидации аварии подъем не возобновился 5 часов /28/. 17 декабря 1979 г. в том же объединении в главном стволе шахты им.Баракова произошла авария вследствие зависания противовеса скипового подъемника. Напущенный канат попал в отделение ствола двухскипового угольного подъема и был оборван движущимися скипами. Противовес при падении произвел большие разрушения армировки ствола угольного и породного отделения, повредив посадочные балки скипов и бункер. Шахта простояла 11 суток. Авария произошла вследствие халатного отношения обслуживающего персонала к своим обязанностям. После замены головного каната противовеса были начаты работы по выдаче породы без уточнения действительного положения в стволе породного скипа и противовеса и проведение регулировки длины каната. Из-за завышенной длины нового каната при движении противовеса вниз его нижние направляющие (башмаки) в зумпфовой части ствола вышли из проводников, и в таком положении противовес был поднят вверх, а при повторном движении вниз произошло его зависание /28/. Крайне неблагоприятное положение с травматизмом сложилось на бадьевых подъемах. Из-за низкой производственной дисциплины и грубых нарушений правил безопасности был допущен групповой несчастный случай на Березниковском ШСУ треста "Шахтспецстрой" Минмонтажспецстроя СССР. В этом управлении при проходке ствола спецметодом (с замораживанием) направляющая рамка бадьевого подъема зависла на обмерзших направляющих канатах ниже уровня нулевой площадки. От раскачивания подъемным канатом движущейся вниз бадьи рамка сорвалась и упала с высоты более 100 м на прицепное устройство, в результате чего произошел обрыв подъемного каната и падение бадьи с находящимися в ней людьми в ствол. Расследованием установлено, что спуск людей в ствол, работа в котором не велась в течение 8 часов, производился без предварительного перегона по нему порожней бадьи.

При отсутствии в применяемом проходческом комплексе технических средств контроля за положением рамки при спуске бабьи в шахтостроительном управлении не были разработаны мероприятия, исключающие аварийные ситуации /29/. Приведенные примеры показывают многообразие причин и последствий аварий при застревании сосудов в стволе, а также необходимость, наряду с соблюдением требований правил, норм и инструкций /34,58,63/, разработки технических средств, фиксирующих начало застревания сосуда, что также связано с непрерывным определением его положения в стволе /49/.

Переподем и превышение скорости. Переподем был и остается одной из главных причин несчастных случаев на шахтных подъемных установках (табл.1.1, 1.2). Еще в недалеком прошлом значительное количество переподемов случалось в результате ошибок машинистов, обычно из-за приложения избыточного тормозного усилия в конце подъема или начале движения в обратную сторону /43/.

В настоящее время соответствующие средства контроля и безопасности достаточно эффективно следят за ошибочными действиями машинистов. Однако тот факт, что 38 переподемов, составляющих 24% от всех случаев, все же имели место при наличии современных автоматических средств, указывает на нерешенность проблемы /43/. В большинстве случаев сопутствующим фактором служило опускание слишком большого груза. Часто переподемы происходили тогда, когда машинист работал при отключенных автоматических устройствах или когда он оказывался в затруднительном положении в вопросе нахождения подъемного сосуда в стволе шахты, из-за многочисленных предыдущих реверсивных его перемещений. Кроме этого, 25 переподемов происходили на многоканатных подъемных установках, при этом 5 из них произошли по причине значительного проскальзывания канатов по отношению к ведущему шкиву /43,102/.

В 1973 г. на шахте Мэркхэм (рис.1.1) произошла наиболее серьезная авария на подъеме в этом столетии. По числу лиц, погибших в этой катастрофе, этот случай является вторым после аварии в Бикершоу в 1932 г., тем не менее по ряду факторов, рассматриваемых ниже, катастрофа Мэркхэма представляется наиболее значительной. Согласно /43/, клеть (29 человек) была брошена в ствол глубиной 469 ярд (429 м) навстречу поднимающемуся порожнему сосуду. Ствол обслуживался двухбарабанным подъемом с приводом по системе Леонарда. Единственный стержень тормозного привода диаметром 51 мм разрушился и полностью исключил возможность приложения механического тормоза. Машинист подъема, услышав мощный толчок и почувствовав, что тормоз не действует, но, не зная точно, что произошло, нажал на кнопку аварийного торможения. Это немедленно привело к выключению электроэнергии и приведению в действие механического тормоза, который оказался уже бесполезным. С того момента, когда машина оказалась без механического тормоза и возможности электрического торможения, несбалансированный груз в направлении опускающегося сосуда разогнал систему до тех пор, пока клеть не врезалась в опорные балки в нижней части ствола.

Основной причиной механического повреждения стержня было заедание поворотной оси в главном рычаге тормозного привода, которое вызвало изгибающее действие такой величины, что нарезная часть конца стержня испытывала пульсирующие напряжения в диапазоне от 0,4 до +12,8 т/дюйм² (1 дюйм = 0,0254 м) /43/.

Этим напряжениям не мог сопротивляться долгое время стержень, изготовленный из стали с содержанием 0,4% углерода и пределом прочности 38 т/дюйм. В стержне стали развиваться трещины у основания резьбы. Одна из них распространилась так, что привела к внезапному разрушению. В официальном докладе было отмечено, что трещина появилась намного раньше и могла быть обнаружена неразрушающим методом контроля, кроме того, после отказа механического тормоза вместо действий по включению аварийного торможения можно было бы включить электродинамическое торможение, что значительно снизило бы скорость движения клетки.

В 1958 г. на скиповой подъемной установке шахты им. Орджоникидзе в Кривбассе произошла авария из-за превышения скорости с обрывом подъемного каната /48/. В результате поломки валика привода левого ретардирующего диска указателя глубины в месте посадки скользящей переставной муфты подъемная машина, работавшая на дистанционном управлении без участия машиниста, оказалась лишенной управления, вследствие чего скорость скипа при подходе к разгрузочным кривым не уменьшалась. Поломка валика произошла за 47 м до места остановки скипа. При наружном осмотре валика в месте излома было обнаружено наличие скрытого порока металла и отсутствие галтели. Скрытый порок послужил причиной образования первоначальной трещины, которая при работе постепенно распространилась по диаметру, что подтверждалось наличием ржавчины на значительной части поверхности излома. Установленный на машине механический ограничитель скорости системы НКМЗ (1955 г. выпуска) из-за поломки приводного валика бездействовал. Произошел переподем скипа при скорости 8,3 м/с. При этом скип ударился рамой с коушем о ригель металлоконструкции копра и коуш разбился. Подъемный канат выдернулся из жимков и скип упал в ствол. При падении скип полностью разрушил 90 шестиметровых проводников, разбил посадочную раму, воронку рудоулавливателя, восемь продольных расстрелов, ригель металлоконструкции копра и разбился сам. Деформировались шесть продольных расстрелов и разгрузочные кривые. Шахта простояла 8 суток на ремонте.

Приведенный выше технический анализ аварий и травматизма на подъемных установках, связанных с движением подъемных сосудов, позволяет установить основные сопутствующие им причины, главные из которых в соответствии с хронологической последовательностью следующие:

- отсутствие средств защиты (до 1920 г.);
- обрыв головного каната (до 1940 г.);

- разрушение прицепных устройств и их отдельных элементов (до 1950 г.);
- несовершенство требований правил безопасности (до 1944 г.);
- несовершенство средств защиты от переподъема, превышения скорости, застревания сосуда (после 1960 г.).

Степень несовершенства средств защиты подъемных установок от переподъема, превышения скорости, застревания сосуда в свою очередь может характеризоваться десятилетними этапами, рассматриваемыми с учетом общего уровня развития техники и с использованием исходных статистических данных /43,63,64/ (табл.1.3):

- 1 – отсутствие средств защиты (1908...1917 гг.);
- 2 – единичные применения средств защиты механического типа (1918...1927 гг.);
- 3 – средства защиты механические (1928...1937 гг.);
- 4 – средства защиты электромеханические (1938...1947 гг.);
- 5 – средства защиты с использованием радиоламп (1948...1957 гг.);
- 6 – средства защиты с использованием транзисторов (1958...1968 гг.);
- 7 – средства защиты с использованием интегральных и больших интегральных схем – ИС, БИС (1968...1977 гг.);
- 8 – средства защиты с использованием микропроцессорных комплектов – МПК и ЭВМ (с 1978 г.).

Результаты обработки статистических данных с использованием корреляционного анализа представлены в табл.1.3, при этом нормированная корреляционная матрица зависимости между этапами степени совершенства средств защиты имеет вид (1.15).

Таблица 1.3

Статистические данные несчастных случаев – травмируемых (смертельно травмируемых) при авариях из-за переподъема и превышения скорости

№№ п/п	Этапы степени совершенства средств защиты (x)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	80 (5)	- (-)	65 (-)	17 (-)	12 (-)	36 (-)	- (-)	- (-)
2	125 (12)	67 (3)	53 (-)	71 (4)	7 (-)	5 (-)	3 (-)	- (-)
3	65 (13)	69 (-)	3 (3)	15 (-)	3 (-)	2 (-)	- (-)	- (-)
4	125 (5)	57 (-)	39 (-)	30 (4)	5 (-)	- (-)	- (-)	- (-)
5	95 (4)	65 (-)	43 (19)	7 (-)	10 (-)	2 (-)	2 (-)	- (-)
6	105 (18)	50 (-)	25 (-)	13 (-)	3 (-)	7 (-)	29 (18)	- (-)
7	- (-)	54 (8)	72 (4)	31 (-)	5 (-)	- (-)	- (-)	5 (5)
8	8 (8)	57 (7)	36 (-)	6 (-)	4 (-)	2 (-)	- (-)	- (-)
9	- (-)	87 (6)	41 (-)	5 (-)	5 (-)	- (-)	- (-)	- (-)
10	4 (4)	93 (7)	30 (4)	3 (-)	4 (-)	- (-)	- (-)	- (-)
$\bar{\lambda}_1(x), \bar{\lambda}_2(x)$	60,7 (6,9)	59,0 (3,1)	40,7 (3,1)	19,8 (1,2)	5,8 (-)	5,4 (-)	3,4 (1,8)	0,5 (0,5)
\bar{D}_i	2795	626	392	420	9	121	82	2,5
$\bar{\delta}_i$	52,8	25	19,8	20,5	3	11	9	1,6

Анализ корреляционной матрицы свидетельствует об имеющейся корреляции между этапами, причем в большей степени это относится к 4,5,6 и 7 этапам, где коэффициенты корреляции принимают достаточно большое значение. Поэтому можно считать, что зависимость интенсивности травматизма от степени совершенства средств защиты подъемных установок для исследованных условий существует. В то же время значения коэффициентов матрицы (1.15) меньше 0,5 свидетельствуют о присутствии в этой зависимости значительного элемента случайности.

$$r = \begin{pmatrix} 1 & K_{12} & K_{13} & K_{14} & K_{15} & K_{16} & K_{17} & K_{18} \\ & 1 & K_{23} & K_{24} & K_{25} & K_{26} & K_{27} & K_{28} \\ & & 1 & K_{34} & K_{35} & K_{36} & K_{37} & K_{38} \\ & & & 1 & K_{45} & K_{46} & K_{47} & K_{48} \\ & & & & 1 & K_{56} & K_{57} & K_{58} \\ & & & & & 1 & K_{67} & K_{68} \\ & & & & & & 1 & K_{78} \\ & & & & & & & 1 \end{pmatrix} =$$

$$= \left\{ \begin{array}{cccccccc} 1 & -0,35 & -0,07 & 0,51 & 0,31 & 0,25 & 0,33 & -0,40 \\ & 1 & -0,39 & -0,09 & -0,57 & -0,86 & -0,11 & -0,07 \\ & & 1 & 0,38 & 0,61 & 0,38 & 0,26 & 0,55 \\ & & & 1 & 0,11 & 0,02 & -0,04 & 0,19 \\ & & & & 1 & 0,70 & -0,28 & -0,09 \\ & & & & & 1 & 0,04 & -0,17 \\ & & & & & & 1 & -0,13 \\ & & & & & & & 1 \end{array} \right\} \quad (1.15)$$

На рис.1.4 приведены зависимости интенсивности травматизма (аварий) от степени совершенства средств защиты, полученные по данным табл.1.3. С учетом рекомендаций и программ расчета, изложенных в /32,33,53/:

$$\tilde{\lambda}_1(x) = 202 \exp(-0,656 \cdot x); \quad (1.16)$$

$$\tilde{\lambda}_2(x) = 9,1 - 2,95x + 0,25x^2, \quad (1.17)$$

где $\tilde{\lambda}_1(x)$, $\tilde{\lambda}_2(x)$ - средние интенсивности травматизма при несчастных случаях, соответственно травмированных и смертельно травмированных; x - степень совершенства средств защиты от переподъема, превышения скорости, напуска каната.

Из рис.1.4 видно, что зависимости (1.16) и (1.17) - нелинейные и описываются соответственно экспоненциальной и параболической функциями. При увеличении степени совершенства средств защиты уровень интенсивности травматизма снижается как травмированных, так и смертельно травмированных, однако в последнем случае обнаруживается незначительная тенденция его роста при $x > 6$. Это обстоятельство может указывать, например, на низкую надежность средств защиты на данных этапах.

Кроме того, значительное количество зафиксированных переподъемов (табл.1.2) указывает на потенциальные аварийные ситуации, причем оценка ожидаемого их количества ($\tilde{m}_l = 9,1$; $\tilde{D}_l = 18,3$; $\tilde{\delta}_l = 4,0$) для доверительной вероятности $\alpha=0,95$ /83/ дает значения (в пределах доверительного интервала $E=\pm 2,65$), равные 7...12 переподъемам в год.

Таким образом, существует реальная опасность аварий и травматизма на современном этапе, при этом главной их составляющей категорией является переподъем и превышение скорости.

1.2. Современное состояние средств защиты

Вопрос о защите подъемных установок от переподъема и превышения скорости освещался в литературе неоднократно. Первая попытка систематизированного изложения материала была осуществлена в /37/, а также в работах /10,16,20,44,48,61,96,103/ и др.

Для защиты подъемной установки от аварийных режимов применяют различную контрольно-защитную аппаратуру, в задачу которой входит контроль отдельных показателей работы установки с тем, чтобы при опасном отклонении их от нормы включать предохранительный тормоз подъемной машины /61/. Правильное взаимодействие отдельных узлов и аппаратов подъемной установки осуществляется с помощью различных конечных (конечных) выключателей /48/.

Особое внимание в оборудовании рудничной подъемной установки занимают конечные выключатели, ограничивающие полную высоту подъема. Согласно правилам безопасности /34/, каждая подъемная установка должна быть оборудована конечными выключателями, установленными на копре и указателе глубины подъемной машины, выключающими установку и включающими предохранительный тормоз при подъеме клетки на 0,5 м выше его нормального положения при загрузке.

Кроме конечных выключателей от переподъема, скиповую подъемную установку с дистанционным управлением оборудуют маневровыми конечными выключателями, осуществляющими избирательность направления вращения подъемной машины при подаче сигнала и нормальную остановку ее в конце движения /48/. Конечные выключатели от переподъема и маневровые устанавливаются на копре в местах, малодоступных для осмотра; работают они в неблагоприятных метеорологических условиях. От качества работы конечных выключателей в большинстве случаев зависит качество работы схемы дистанционного управления и надежность предупреждения аварий от переподъема со скоростью, ограничиваемой ограничителем скорости /48,61/.

Современная и надежная остановка подъемной машины при переподъеме зависит не только от того, как быстро сработает предохранительный тормоз /84/, но и от собственного времени срабатывания аппаратов защиты и, в частности, конечного выключателя. Поэтому наиболее важными требованиями, предъявляемыми к конечным выключателям, как и к каждому аппарату защиты, являются минимальное допустимое время срабатывания и самоконтроль исправного состояния цепи /61/.

В этом направлении в последние десятилетия происходило совершенствование конечных выключателей для шахтного подъема.

Наиболее широкое распространение на подъемных установках получили различные типы конечных выключателей /16,18,23,48,54,61, 87/. Механические конечные выключатели представляют собой контактную систему, размыкающуюся при механическом воздействии на нее подъемного сосуда (при установке на копре) или гайки кулачка диска указателя глубины (при установке на указателе глубины).

Схема включения контактов конечных выключателей в цепь защиты подъемной установки показана на рис.П.1.1а /61/. При включении предохранительного тормоза конечным выключателем ВК1 (ВКУ1) или ВК2 (ВКУ2) для ликвидации переподъема в схеме предусмотрены обходные переключатели ПО. Обходной переключатель имеет четыре контакта: два из них ПО1 и ПО2 в нормальном положении разомкнуты и включены в цепь защиты параллельно контактам конечных выключателей; два других ПО3 и ПО4 включены в цепи катушек реверсирующих контакторов В, Н, при этом контакты заблокированы между собой. При ликвидации переподъема эта блокировка предотвращает пуск машины в сторону дальнейшего переподъема. Основными недостатками механических конечных выключателей являются отказ в действии при замыкании проводов, идущих к выключателю, или поломка механической части выключателя /37,48,61/.

Из индуктивных конечных выключателей для подъемных установок наибольшее распространение получили два типа: ВКИ (выключатель конечный индуктивный) и ВМ (выключатель магнитный) /61/. Работа выключателя типа ВКИ (рис.П.1.1б) основана на изменении индуктивного сопротивления чувствительного элемента при бесконтактном воздействии на его магнитную цепь шунта подъемного сосуда, вследствие которого происходит срабатывание его выходного элемента – реле, коммутирующее своими контактами цепь защиты подъемной установки. Выключатели типа ВМ срабатывают в результате воздействия на его чувствительный элемент внешнего магнитного поля постоянного магнита, закрепленного на подъемном сосуде. В последние годы в качестве выключателей используются бесконтактные высокочастотные и индуктивные датчики типа ДКП-3,5, БВМ, БДП8-И /92,93/, типа 709 /16/, герконовые – типа ДПЭ-100, ДПЭ-200 /54/, а также автогенераторные /18/. Схемы ВКИ и ВМ обладают самоконтролем исправности элементов, при вероятном повреждении которых выходное реле выключателей обесточивается.

Исследованиями, проведенными в МакНИИ, было установлено /61/, что время срабатывания индуктивных конечных выключателей типа ВКИ-1, ВМ-66 и других не превышает 0,015 с. Вместе с тем, конечный выключатель обеспечивает надежную защиту от переподъема только в том случае, если скорость подхода подъемного сосуда к приемной площадке небольшая. Например, для клетового подъема в соответствии с правилами безопасности /34/, максимальное значение высоты переподъема составляет $h_{nep}=6$ м. Если принять, что при спуске груза предохранительный тормоз развивает минимальное допустимое замедление $a=1,5$ м/с², то машина остановится на участке допустимого переподъема в том случае, если скорость подхода сосуда к конечному выключателю будет составлять /61/

$$V_{max} = \sqrt{2a(h_{nep} - 0,5)}. \quad (1.18)$$

Для нашего случая $V_{max}=4$ м/с. Это будет справедливо при мгновенном приложении тормозного усилия после размыкания цепи защиты. Однако из-за инерционности аппаратов защиты, в том числе и тормозного устройства /91/, величина безопасной скорости подхода к конечному выключателю будет еще меньше. Так, при большей скорости подхода подъемного сосуда к конечному выключателю он, хотя и включает предохранительный тормоз, однако аварию переподъема предотвратить не сможет, так как в этом случае путь предохранительного торможения окажется больше допустимой высоты переподъема. Кроме того, конечный выключатель принципиально не может защитить подъемную установку от жесткой посадки подъемного сосуда, так как он устанавливается выше нормального верхнего его положения. В связи с этим подъемные установки с максимальной скоростью движения, превышающей 3 м/с, оборудуют аппаратами ограничения скорости /34,61/. Известно /48/, что ограничитель скорости осуществляет контроль превышения максимальной скорости движения подъемных сосудов и контроль выполнения диаграммы скорости в период замедления. Действующие правила безопасности /34/ требуют, чтобы ограничитель скорости включал предохранительный тормоз при превышении максимальной скорости на 15% и не допускал подхода сосуда к нормальному верхнему положению со скоростью более 1,5 м/с.

Однако указанные требования к ограничителю скорости не определяют еще его надежную и безотказную работу. Эффективность выполнения аппаратом защитных функций зависит также и от его быстродействия, допустимой погрешности, степени охвата элементов самоконтролем и др. /61/.

В предыдущие годы широко применялся механический ограничитель скорости НКМЗ /61/, конструктивно совмещенный с указателем глубины. Элементом, реагирующим на действительную скорость движения, является косонасаженный балансир, приводимый в действие от вала подъемной машины

Недостатками ограничителя скорости этого типа, снижающими эффективность и надежность его работы, являются: отсутствие автоматического контроля исправности механических элементов пружинного балансира и узла сравнения скоростей; низкая чувствительность измерительного элемента на нижнем пределе диапазона контролируемых скоростей. В зарубежной практике механические ограничители скорости также находили применение.

Электрический ограничитель скорости типа РОС-5912, РОС-5914 (рис.П.1.1в) состоит из тахогенератора ТГ, двух командоаппаратов КАВ, КАН, реле ограничения скорости РОС и реле контроля исправности цепи

РКЦ. Размыкающий контакт реле РОС включается в цепь защиты подъемной установки. Датчиком действительной скорости является тахогенератор. Расчетный закон изменения скорости в функции пути имитируется сопротивлением командоаппаратов КАВ, КАН, для чего на участке угла поворота диска указателя глубины, соответствующего периоду замедления, устанавливается профилированный кулак, который воздействует на ролик рычага, управляющего сопротивлением КАН (КАВ). Такая схема электрического ограничителя скорости используется только на подъемных машинах с асинхронным приводом /61/; для подъемных машин с приводом по системе Г-Д используется другая схема /48/. К недостаткам электрического ограничителя скорости РОС-5914, снижающим его надежность, относятся /61/: отсутствие контроля исправности механических приводов командоаппаратов; отсутствие контроля исправности цепи тахогенератора при отключенном контакторе У5; понижение точности работы при больших высотах подъема из-за малого масштаба контролируемого пути замедления; ступенчатое задание допустимой скорости, снижающее точность контроля; использование в качестве измерительного элемента электромагнитного реле, порог срабатывания которого меняется в значительной степени при изменении окружающей температуры и величины натяжения пружины. От ряда указанных недостатков свободны усовершенствованные схемы ограничителей /96/, однако и в этом случае имелись потери аппаратом защитных функций /61/.

Электрический ограничитель скорости фирмы ASEA (Швеция) /61/ по принципу работы аналогичен РОС-5914 и отличается беспрофильным заданием скорости, большим масштабом контролируемого пути замедления, дублированием защиты от превышения максимальной скорости подъема. Недостатки в основном аналогичны РОС-5914.

Бесконтактный ограничитель скорости с индуктивным командоаппаратом подробно описан в /96/. В нем применен бесконтактный сельсинный командоаппарат, обеспечивающий бесступенчатое задание скорости от профилированного кулака на ретардирующем диске указателя глубины. Сравнение действительной и расчетной скорости осуществляется магнитным усилителем. Главным недостатком этого ограничителя является значительное время срабатывания, составляющее 0,3...0,6 с. Конотопским электромеханическим заводом "Красный металлист" был разработан опытный образец электрического ограничителя типа ОСВ /61/, основным недостатком которого является невозможность точной работы аппарата при появлении люфтов в сочленениях, передающих вращение от блоков фактической и заданной скоростей к блоку сравнения. Однако одним из наиболее широко известных аппаратов является ограничитель скорости типа ЭОС-2 /61,92,93/, блок-схема которого показана на рис.П.1.2. Ограничитель состоит из четырех основных блоков: заданной скорости 12; действительной скорости 3, 4; сравнения 16, 17 и исполнительных блоков 18, 19.

Расчетная скорость движения задается беспрофильным блоком задания скорости, состоящим из сельсинных командоаппаратов 9, 10. Напряжение на выходе сельсин-датчиков изменяется в функции пути по синусоидальному закону, а расчетная скорость движения подъемных сосудов в период замедления – по параболическому закону при помощи нелинейных элементов 13, 14.

ЭОС-2 может контролировать симметричную и несимметричную диаграммы скорости. Основным недостатком ограничителя является сложность конструкции, требующая от обслуживающего персонала высокой квалификации /61/. Усовершенствованным аппаратом ограничения скорости является ЭОС-3 (рис.П.1.3) /95/. Однако его недостатки аналогичны ЭОС-2, несмотря на использование в нем логических структур, реализованных на дискретных элементах, способствующих повышению надежности работы аппарата. Общими недостатками электромеханических устройств защиты подъемных машин являются /95/:

- наличие большого числа сложных механических узлов с вращающимися деталями, которые подвержены износу и не обладают достаточной надежностью;
- значительная громоздкость;
- недостаточная точность информации из-за наличия люфтов;
- сравнительно высокая стоимость электромеханических аппаратов, обусловленная многообразием их конструкций для различных условий работы и малым объемом их выпуска.

1.3. Пути повышения эффективности средств защиты

С целью определения дальнейшей эффективности средств защиты от переподъема и превышения скорости рассмотрим кратко процесс предохранительного торможения подъемной установки (рис.П.1.4) /61, 91/. Пусть в какой-либо точке ствола (рис.П.1.4, точка a), отстоящей на определенном расстоянии x_p от нормального верхнего положения, произошел разрыв цепи защиты подъемной установки, тогда в период холостого хода тормоза установка будет двигаться с ускорением свободного выбега (например, при спуске груза скорость увеличивается по участку $бв$ кривой 1). После окончания холостого хода тормоза колодки придут в соприкосновение с тормозным ободом, и величина тормозного момента начнет увеличиваться, при этом также будет увеличиваться скорость (участок $вг$ кривой 1) до уравнивания тормозного момента статическому и затем начнется процесс замедленного движения до полной остановки машины (участок $гд$ кривой 1). Если в точке разрыва цепи защиты увеличивать скорость, то наступит такое положение, при котором величина пути предохранительного торможения станет равной расстоянию до приемной площадки (кривая 2). Допустимая величина переподъема x_n в этом случае останется в качестве запаса. Критическому состоянию соответствует момент, когда тормоз-

ной путь станет равным расстоянию от точки a до нормального верхнего положения с учетом высоты переподъема (кривая 3). Дальнейшее повышение скорости вызовет аварийный переподъем. В свою очередь, меньшему замедлению при аварийном торможении будет соответствовать меньшая величина скорости, при которой процесс торможения закончится в конце высоты переподъема и для данной подъемной установки определяется величиной полезного груза и направлением его движения. Следовательно, поскольку для каждой точки ствола существует своя критическая скорость по условиям своевременной остановки подъемных сосудов (в том числе определенной по условию жесткой посадки), постольку необходимо для обеспечения эффективной защиты от переподъема и превышения скорости точно и непрерывно выполнять защитную диаграмму скорости в функции пути, подобно уравнению диаграммы рабочей расчетной скорости /61/

$$V_3 = \sqrt{2a_3(x_3 - x_{\text{дом}}) + V_n^2}, \quad (1.19)$$

где a_3 – замедление защитной диаграммы скорости; x_3 – текущее значение пути до нормального верхнего положения; $x_{\text{дом}}$ – путь дотяжки; V_n – допустимая скорость подхода к нормальному верхнему положению подъемного сосуда.

Таким образом, создание эффективных средств непрерывного определения пути, проходимого подъемным сосудом, является важной задачей, имеющей как самостоятельное значение, так и определяющей функциональные возможности устройств защиты от переподъема, защиту от превышения скорости, дифференцированную по пути максимальную защиту, защиту от застревания сосудов в стволе и т.п. Как самостоятельная, система непрерывного определения местоположения подъемного сосуда в стволе шахты осуществляет отбор путевых команд в заданных точках ствола, формирование и индикацию параметров движения сосудов, формирование задающих сигналов для систем авторегулирования скорости и др.

Значимость такой системы возрастает с увеличением глубины шахты и связанной с этим необходимостью применения многорежимных подъемов, связывающих между собой различные горизонты при разных значениях установившихся скоростей, ускорений, рывков. Высокая требуемая разрешающая способность средств измерения пути (порядка 0,005% от глубины ствола /101/) не может быть обеспечена аналоговыми устройствами. Поэтому возникает необходимость применения исключительно цифровых устройств, основанных на дискретных методах измерения пути, проходимого подъемным сосудом. Для реализации этого метода необходимо наличие надежных датчиков путевых импульсов и устройств для их преобразования, способных работать в шахтных условиях.

В настоящее время на новых подъемных машинах применяется комплексная электромеханическая аппаратура управления и защиты, основанная, как правило, на косвенных методах получения и обработки путевой информации, с использованием контактных и бесконтактных устройств формирования и выдачи путевых команд и программных аппаратов, сельсинных указателей глубины, предохранительных устройств (рис. П.1.5, П.1.6 /66,77/). Недостатком электромеханической аппаратуры является двойное преобразование информации – поступательного движения подъемного каната в виде электрических сигналов на выходе блоков воспроизведения в механический поворот вала, который с помощью этажных выключателей, командоаппаратов и сельсинов вновь преобразуется в электрические сигналы для управления машиной /95/. На базе метода непосредственного отбора путевой информации с использованием магнитной привязки к головному канату /101/, для многоканатных подъемных установок была создана аппаратура ГОРИЗОНТ (рис. П.1.7) /102/, которая формирует импульсы в отдельных точках пути движения подъемного сосуда для схемы автоматического управления и электрические сигналы для определения пути, пройденного подъемным сосудом сельсинным указателем глубины; контролирует превышение фактической скорости над заданной в период разгона, равномерного хода, замедления, обеспечивает самоконтроль цепей. Метод магнитных меток был использован также при разработке аппаратуры СКИП (рис. П.1.8) /102/ для автоматизации скиповых подъемных установок. Эта аппаратура выполняет управление движением подъемной установки в соответствии с расчетной диаграммой скорости, управляет сельсинным указателем глубины, формирует путевые команды и осуществляет защиту от переподъема. Недостатком аппаратуры является зависимость кванта путевого импульса от упругого удлинения головного каната и, как следствие этого, возникновение погрешности считывания информации о пути /102/.

Одним из наиболее перспективных направлений совершенствования схем автоматизации подъемных установок в целях повышения надежности и безопасности их эксплуатации является использование современных средств измерительной и вычислительной техники. Микропроцессоры и специализированные микроЭВМ позволяют создавать относительно простые, точные, обладающие многофункциональными возможностями универсальные системы управления и защиты для подъемных установок всех типов. Особенно эффективно использование микроЭВМ для задания и выполнения программы движения многогоризонтных клетевых подъемов. Структурно-функциональная схема такой информационно-измерительной системы с условным наименованием СТАРТ /71,80,81/ приведена на рис.1.5. Система построена с учетом унификации узлов и блоков, принципов конструктивного агрегатирования /90/ и обеспечивает получение цифровой и аналоговой информации: о натяжении головного каната (измерение веса транспортируемого груза); напуске каната и его перегрузке; застревании сосуда; состоянии и целостности пружины парашютного устройства; положении вагонеток в клетях; механизма стопора и клетевой двери; угловых перемещениях и скорости барабана подъемной машины; местоположении и скорости подъемных сосудов в стволе; других параметрах с учетом резервных. Кроме того, система

позволяет осуществить дуплексную передачу – прием речевых сообщений между подъемным сосудом и машинным залом, передачу и квитирование сигналов управления подъемной машиной и др. Обработка технологической (местоположение, скорость подъемных сосудов) и аварийной (переподъем, превышение скорости и др.) информации, ее накопление, хранение, отображение и вывод на печать (документирование) производится средствами вычислительной техники на микропроцессорной основе (Электроника МС 2702 или Электроника МС 2721), что способствует широкому использованию системы как на действующих подъемах, так и проектировании АСУТП шахт будущего. Принципиальной отличительной особенностью системы от известных /80/ является применение универсального, реверсивного преобразователя линейных перемещений для непрерывного определения положения подъемных сосудов в стволе с высокой точностью (0,025 м по высоте до 3000 м), выполненного в виде однородной и неоднородных петлевых линий, одновременно обеспечивающих функции линии связи /70,71,82/.

Применение микропроцессорных средств и новой элементной базы (в том числе интегральных микросхем) позволяет существенно повысить чувствительность и быстродействие всех программных, защитных, контрольных блоков и узлов системы и поднять уровень безотказности их работы. На базе микроЭВМ, кроме того, может быть построена диагностическая система подъемной машины-установки, которая позволит контролировать техническое состояние элементов, схем автоматизации, защиты, механических узлов, однозначно определить причины отказа и др.

1.4. Задачи и методика исследования

Данная работа посвящена проблеме повышения безопасности эксплуатации рудничных подъемных установок путем создания эффективных средств защиты подъемных установок от переподъема и превышения скорости на основе непрерывного определения положения сосудов и ее связи с рабочим и предохранительным торможением во вновь проектируемых подъемах. В соответствии с этим необходимо решить следующие основные задачи:

- изучить анализ аварий на подъемных установках, связанных с движением подъемных сосудов;
- проанализировать способы и средства защиты подъемных установок от аварий и сформировать на этой основе требования к качественным и количественным показателям системы непрерывного определения положения сосудов;
- разработать структуру системы и способы ее реализации, обеспечивающих требуемые показатели;
- выполнить выводы и анализ аналитических зависимостей, определяющих расчетные параметры преобразователей перемещений в функции заданных показателей системы;
- определить по результатам исследований рациональные конструктивные параметры элементов системы и разработать средства ее технической реализации;
- изготовить, испытать и внедрить экспериментальные образцы средств системы на действующих и вновь проектируемых подъемных установках;
- определить эффективность и произвести оценку повышения безопасности при эксплуатации рудничных подъемных установок от внедрения средств системы.

Перечисленные задачи решаются при помощи следующих методов исследований:

- метода критического анализа литературных источников и материалов об авариях;
- методов технического, статистического и вероятностного анализа травматизма и аварий;
- аналитического метода исследования с помощью ЭВМ свойств и параметров преобразователей перемещений;
- метода генератора стандартного поля зоны индукции;
- метода стендовых испытаний;
- метода автоматического сбора и обработки данных с помощью специализированной микроЭВМ;
- метода производственно-технического эксперимента.

2. СПОСОБЫ И СРЕДСТВА НЕПРЕРЫВНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ПОДЪЕМНЫХ СОСУДОВ В ШАХТНОМ СТВОЛЕ

Специфика рудничного подъема, где значительные скорости движения по стволу сочетаются с необходимостью высокой точности остановки подъемных сосудов, требует точности и надежности работы аппаратов управления и защиты /102/. В процессе управления аппаратура должна непрерывно получать и обрабатывать информацию о перемещении сосудов в стволе таким образом, чтобы для каждого текущего положения подъемных сосудов сформировать сигнал управления и допустимые параметры защиты. Качество управления и защиты подъемной установки во многом определяется способами и средствами получения информации о перемещении сосудов в стволе. В настоящее время широкое распространение получили в основном способы и средства косвенного формирования информации о пути, которые идентифицируют угол поворота вала подъемной машины в линейное перемещение подъемного сосуда в стволе. Однако в большинстве случаев осуществления надежной защиты подъемной установки от аварийных режимов (переподъем, превышение скорости, застревание сосуда и т.п.) косвенной информации о параметрах движения сосудов недостаточно. Как было показано выше, отсутствие достоверной информации о непосредственном перемещении сосудов в стволе приводило к тяжелым авариям, связанным с гибелью людей.

2.1. Анализ способов и устройств косвенного и непосредственного определения положения сосудов и требования, предъявляемые к ним

В соответствии с классификацией (рис.П.2.1) /43/, проанализируем современные способы и устройства косвенного и непосредственного определения местоположения сосудов в стволе.

На подъемных установках широко применяется известный аппарат типа АЗК-1 (рис.П.2.2) /102/, относящийся к устройствам косвенного отбора информации о пути, в состав которого входит рассмотренный выше ограничитель скорости ЭОС-2, а также реле контроля вращения РКВ-1. Исправность кинематической цепи, передающей вращение от вала подъемной машины к валам этажных выключателей и к блоку сельсин-датчиков, контролируется при скорости движения подъемного сосуда свыше 1,5 м/с. АЗК-1 – аппарат электромеханического типа, которому присущи недостатки, относящиеся к любому устройству подобного типа /102/. В /103/ рассмотрен комплект аппаратуры (рис.П.2.3), предназначенной для автоматического управления, в которой использован бесконтактный, косвенный способ получения информации при помощи импульсного преобразователя угла поворота барабана подъемной машины. Импульсный преобразователь (ИП) представляет собой зубчатый диск или зубчатый цилиндр, расположенный на внутренней поверхности барабана машины и воздействующий на два неподвижных концевых выключателя. Количество зубцов ИП для каждого типа подъемной машины выбирается таким образом, чтобы один шаг зубцового деления соответствовал перемещению подъемного сосуда в стволе на 0,1 м. Бесконтактные выключатели, взаимодействующие с зубцами ИП, закреплены на неподвижном кронштейне со сдвигом между осями выключателей, кратном 0,25 шага зубцового деления, что позволяет получать информацию о пути перемещения и о направлении движения /23,50,87/. Обладая рядом достоинств, указанное устройство, тем не менее, не является универсальным, так как для других диаметров барабанов подъемных машин требуется осуществлять местную привязку ИП. Кроме того, в подобных устройствах используются цифроаналоговые элементы, обладающие невысокой точностью преобразования информации о параметрах движения сосудов /10/. В последнее время для осуществления технологической автоматики и защиты подъемных установок все более предусматривается применение микропроцессорных средств и логических контроллеров /66,77,80/. Непрерывно совершенствуется защита от превышения скорости и переподъема ввиду их исключительной важности. Как показывает обзор /77/, настоящий этап характеризуется интенсивным внедрением средств контроля и защиты на основе применения микроЭВМ. Известные фирмы "Дженерал Электрик Компани" (США), "Компания инженеров в Сиднее" (Австралия), "АЕГ-Телефун-кен" (ФРГ), а также фирмы Великобритании, Японии и Франции в своих разработках, как правило, используют средства для измерения пути и скорости движения подъемной машины, при этом защитное устройство состоит из датчиков, микропроцессора и дисплея на пульте машиниста. Датчики измерения пути могут быть в виде магнитных меток на канате, индукторнозубчатого колеса, кодирующего оптического устройства и др. Основное требование к датчикам пути – измерение единицы пути с достаточной точностью. Сигналы о пути передаются в микроЭВМ, в которой осуществляется двойное программирование и проверка точности для обеспечения надежности действия защитного устройства. Определение пути осуществляется посредством подсчета путевых импульсов, а средняя скорость определяется по пути за период времени. Дисплей обеспечивает машинисту непрерывную информацию в цифровом или аналоговом виде о пройденном машиной пути и скорости движения.

Следует отметить, что использование микропроцессорных средств определяется, прежде всего возможностью создания гибкой и универсальной системы защиты, которая легко приспосабливается к различным типам подъемных машин. Достоинством устройств технологической автоматики и защит на базе микроЭВМ является высокая надежность и многофункциональность, позволяющие решать дополнительные задачи без увеличения аппаратурной части. Изменение решаемых задач производится лишь сменой программы устройства. Наиболее совершенным устройством косвенного и непрерывного определения пути движения подъемных машин для их программирования является новый задатчик скорости /107/. Характерным признаком таких задатчиков скорости /44/ является непрерывное определение необходимого пути замедления в зависимости от максимальной скорости движения сосуда. Устройство работает по способу однократного ограничения скорости, при этом ниже максимальной скорости возможна любая промежуточная скорость. Кроме этого, устройство обеспечивает различные величины ускорений и замедлений. На рис.П.2.4 показаны диаграммы движения, которые может формировать устройство FKR 80 /107/.

Работа устройства состоит из этапов расчета заданной скорости и точки начала замедления с учетом соблюдения ограничений, при котором постоянно сравниваются пройденный путь с заданным, и в необходимых случаях подается сигнал на замедление подъемной машины. Положение клетки определяется путем подсчета импульсов с датчика, установленного на валу барабана. Направление вращения определяется оценкой фазы двух смещенных на 90° импульсных последовательностей от датчика. Для коррекции рассчитанного пути используются магнитные датчики, установленные на горизонтах в стволе шахты. В системе FKR 80 цифровое значение пути вводится в микроЭВМ ЛОГИСТАТ СР 550. Туда же подаются сигналы режима работы, максимальной скорости и горизонта назначения. По этим сигналам ЭВМ рассчитывает заданную скорость по пути. Через цифро-аналоговый преобразователь и усилитель задающая величина скорости подается в систему регулирования приводом. Программа занимает объем 8К памяти. Функция программы заключается в расчете предельных значений ускорения и рывка (рис.П.2.4) в зависимости от выбранного режима работы, расчета заданного цикла движения и заданной величины скорости, расчета заданной величины пути замедления в цикле движения и сравнения с действительной величиной оставшегося пути до горизонта назначения, выдачи команды на замедление, осуществлении изменения программы скорости в процессе замедления в функции указанного сравнения заданного пути замедления и оставшегося пути до горизонта.

Программа подъема с величиной пути 1000 м, максимальной скоростью 12 м/с обеспечивает расчет и выдачу 12000 значений заданной скорости и производит 11000 расчетов пути замедления /77/.

Таким образом, использование микропроцессоров позволяет рассчитать, например, функцию (1.19) и значительно повысить эффективность средств защиты.

Для непосредственного определения местоположения подъемного сосуда используется известный способ магнитной записи меток на стальных канатах /9,11,25,26,59,102,109/. В /95,101,102/ описывается устройство для определения местоположения подъемного сосуда, в котором носителем информации о пути является головной канат, с нанесенными на него с определенным шагом магнитными метками. Магнитомодуляционные датчики, установленные на копре, производят считывание магнитных меток, последующий подсчет которых воспроизводящим блоком позволяет судить о положении сосуда в стволе. Такое устройство было впервые применено на многоканатных подъемных установках со шкивами трения для автоматического исправления ошибки в измерении пути, возникающей вследствие проскальзывания каната по шкиву, а также для дистанционного управления подъемной машиной. Однако подобные устройства позволяют судить о положении сосуда лишь косвенно, по длине головного каната, без учета его упругой деформации, зависящей от количества груза и высоты подъема. Известны также аналогичные устройства (А.с.№ 256961 СССР), использующие радиоактивные метки, но обладающие, по существу, теми же недостатками. От части некоторых недостатков свободно устройство (рис.П.2.5, А.с. № 523014 СССР), содержащее линию связи, выполненную в виде закрепленного вдоль ствола шахты каната, на котором также нанесены магнитные метки, воздействующие на два магнитомодуляционных датчика, расположенных на подъемном сосуда. Датчики смещены один относительно другого на четверть шага магнитных меток для определения направления перемещения сосуда. Путьевые сигналы, считанные датчиками, кодируются по частотному признаку и при помощи индуктивного передающего устройства (излучающий элемент которого представляет тороидальную катушку, охватывающую маркерный канат) передаются на вход приемного устройства, расположенного в машинном отделении. Применяемый принцип записи магнитных меток на канат позволил решить (на уровне изобретений) многие задачи автоматизации рудничных подъемных установок (А.с. № 261872 СССР, 1970; А.с. № 259339 СССР, 1969; А.с. № 256961 СССР, 1963; патент № 1816731 ФРГ, 1970 и др.), связанные с контролем и ограничением скорости, управлением, сигнализацией и др. /55/. Одним из последних устройств, в котором также используются магнитные метки для получения сигналов о пути непосредственно от подъемного сосуда, является аппаратура АЗН /12/, контролирующая застревание сосуда в любой точке ствола. Принцип работы устройства основывается на сравнении пути движения подъемного сосуда с вращением органа навивки каната. При рассогласовании этих движений выдается аварийный сигнал о напуске каната. Отбор информации о перемещениях и их сравнение происходит в дискретной форме. Путьевые импульсы от органа навивки формируются при помощи импульсного датчика, а от подъемного сосуда, упомянутыми магнитными метками, нанесенными на маркерный канат, проложенный по стволу шахты. Считывание магнитных меток производится специальным магнитомодуляционным датчиком, а передача ин-

формации на поверхность осуществляется передающим полуконкомплексом. О некоторых недостатках такой системы говорилось выше. К сказанному следует добавить, что с увеличением глубины ствола возникают дополнительные трудности, связанные с поддержанием маркерного каната и устранением его колебаний при движении подъемного сосуда. Что же касается способа отбора информации о пути при помощи магнитных меток, то основные недостатки его следующие /82/: необходимость в специальной аппаратуре для нанесения магнитных меток на маркерный канат, а также необходимость демонтажа передающего полуконкомплекта при их записи (перезаписи); стирание магнитных меток при воздействии размагничивающего поля (например, при сварочных работах вблизи ствола); невозможность уменьшения шага (менее 0,4...0,6 м) магнитных меток для повышения точности контроля местоположения сосуда; наличие магнитомодуляционного датчика (датчиков); неэкономичность передающего устройства и т.п.

К достоинствам устройства следует отнести наличие самоконтроля работы всех элементов аппаратуры и возможность многоцелевого использования канала связи.

Новым направлением в области преобразователей больших перемещений, а следовательно, в области контроля местоположения движущихся объектов является использование для этих целей неоднородных линий (рис.П.2.6), прокладываемых вдоль пути движения и взаимодействующих в зоне индукции с передающим устройством, установленном на объекте. Этот принцип изложен в серии изобретений последних лет: патенты Японии № 51-12883, 1976; № 51-6925, 1976; № 52-31607, 1977; № 52-34802, 1977; № 53-44725, 1978; патент США № 3877666, 1977; патент ФРГ № 1908399, 1973, а также в работах /20,70/ и др. Например, изобретение (патент Японии № 52-34802) характеризуется тем (рис.П.2.6а), что при прохождении подвижного состава с смонтированной в него рамочной антенной передатчика через точки скрещивания петлевой неоднородной линии осуществляется опрокидывание *эдс*, возникающей в момент прохождения подвижного состава через точки скрещивания, а детектирование опрокидывания фазы сигнала происходит при помощи дополнительного стандартного сигнала, посылаемого с подвижного объекта. Данное устройство содержит развитую систему преобразовательных элементов и отличается значительной сложностью приемного устройства. Однако несомненным преимуществом рассматриваемых устройств по сравнению с устройствами, использующими магнитные метки, является отсутствие специальных считывающих датчиков; получение точных путевых импульсов, независимых от скорости перемещения объекта; возможность контроля движения объекта по любому заданному пути перемещения (вертикальному, горизонтальному, криволинейному) и т.д. На уровне изобретения решен вопрос об определении перемещения движущегося объекта при помощи кабеля со скрученными проводниками (рис.П.2.7, А.с. № 1229156 СССР, 1986).

В работах /71,82/ впервые приводятся сведения об использовании неоднородной петлевой линии (НПЛ) /52/ в условиях ствола шахты для определения местоположения подъемного сосуда (рис.2.1) и разработки универсальной, быстродействующей аппаратуры свободной от недостатков систем с магнитной записью информации о пути /79/.

Теоретическая оценка возможности использования радиоволн СВЧ и оптических квантовых генераторов при создании устройств контроля перемещения объектов приведена в /20,72,102/, однако практического применения в стволах шахт не получила из-за необходимости обеспечения удовлетворительной оптической видимости при прохождении информационного сигнала, отраженного от подъемного сосуда.

Следует отметить перспективность корреляционного метода для контроля и измерения скорости и пути перемещения движущихся объектов, подробно изложенного в /56/.

Таким образом, в практических устройствах определения параметров движения подъемной машины и сосудов наибольшее распространение получили импульсные датчики пути и скорости. Типичным импульсным датчиком косвенного определения параметров движения подъемных сосудов является реверсивный преобразователь угловых перемещений барабана с оптической системой считывания информации /80/, а типичным импульсным датчиком непосредственного определения параметров движения является преобразователь линейных перемещений с использованием либо магнитных меток, нанесенных на маркерный канат /12/, либо кабеля с прорезями в изоляции /77/, или со скрученными проводниками /20/, либо в виде неоднородных петлевых линий /70,71,80,82/. Для эффективной защиты подъемных установок (от переподъема, превышения скорости и т.п.) применяется двухканальная система контроля (рис.П.2.8) /80,103/ с использованием средств как косвенного, так и непосредственного определения положения сосудов, что обеспечивает режим самоконтроля системы при выполнении защитных функций.

В общем случае требования к преобразователям угловых и линейных перемещений следующие /50/: точность преобразования; чувствительность; быстродействие; стабильность характеристик; диапазон изменения входной и выходной величин; независимость входных и выходных цепей; однозначность зависимости выходной величины от входной (отсутствие гистерезиса); возможность абсолютного отсчета перемещений; возможность дистанционных измерений; помехоустойчивость (возможность эксплуатации в условиях электрических помех, магнитных полей, колебаний амплитуды, частоты и фазы питающих напряжений); устойчивость к изменениям параметров внешней среды (температуры, влажности, вибраций и т.д.); высокая надежность, малые габариты и малая масса; унификация и взаимозаменяемость, малая стоимость. Из всей совокупности нормируемых и ненормируемых параметров (ГОСТ 8.009-72) для преобразователей угловых и линейных перемещений наиболее существенными являются три группы взаимозависимых параметров: диапазон преобразования, раз-

решающая способность и точность преобразования. Кроме того, преобразователи линейных и угловых перемещений должны обеспечивать реверсивный режим работы при изменении направления перемещения (вращения) /79,80/. Применительно к преобразователям линейных и угловых перемещений для определения положения сосудов дискретные сигналы о пути должны составлять 0,025 м и по высоте ствола до 3000 м /79,80,102,103/. Основные требования к аппаратам ограничения скорости изложены в /61/.

Время срабатывания средств защиты подъемных установок не должно превышать:

- 0,1 с для вертикальных подъемов;
- 0,2 с для наклонных подъемов.

Количественные характеристики надежности средств защиты должны составлять:

- средняя наработка на отказ $T_o = 7200$ ч;
- вероятность безотказной работы в течение 720 ч, $P_{(720)} > 0,9$.

Срок службы средств защиты до капитального ремонта:

- не менее 5 лет.

2.2. Способы определения направления перемещения сосуда

Существует несколько способов осуществления реверсивного режима работы НПЛ совместно с передающими устройствами /82/, однако наибольший интерес представляют два из них (рис.2.2). Схема по первому способу (рис.2.2а) допускает работу устройства в указанном режиме с одним передатчиком, излучающим несущую частоту f_1 , и двумя идентичными приемниками с рабочими частотами f_1 , но требует применения еще одной НПЛ (проводники 2 и 3), смещенной относительно первой НПЛ (проводники 1 и 4) на четверть шага M . При движении РАП 1 вместе с сосудом вдоль НПЛ на выходах (выход 1, выход 2) приемников 1, 2 (входы 1 и 4, 2 и 3 которых подключены к соответствующим проводникам НПЛ) будут иметь место сигналы квантов пути, сдвинутые по фазе на четверть шага ($M/4$). Это обстоятельство является достаточным условием получения информации о направлении перемещения /23/.

Схема по второму способу (рис.2.2б), по существу, обеспечивает тот же режим работы, что и первый (здесь на четверть шага сдвинуты РАП 1 и РАП 2), однако для своей реализации требует применения двух передатчиков, работающих на различных частотах (f_1 и f_2). При этом требуется применение двух приемников на соответствующие рабочие частоты. Представляется более предпочтительным первый способ (рис.2.2а), позволяющий осуществить контроль местоположения второго сосуда (клетки, противовеса) лишь добавлением соответствующего комплекта приемопередающих устройств на рабочую частоту f_2 , тогда как по второму способу (рис.2.2б) потребовалось бы использовать четыре различные несущие частоты.

2.3. Расчет параметров элементов устройств

Расчет оптического диска преобразователя угловых перемещений. Поскольку преобразователь имеет жесткую механическую связь с валом барабана подъемной машины /80/, то угловые перемещения барабана должны быть преобразованы в соответствующий сигнал, пропорциональный требуемому кванту линейного перемещения головного каната (косвенно подъемного сосуда). Так как подъемные машины имеют различные диаметры барабанов, то задача по расчету конструктивных размеров преобразователя, которые определяются в основном диаметром оптического диска, сводится к нахождению минимального диаметра диска для данного кванта контролируемых перемещений. Для ряда диаметров барабанов большинства подъемных машин, равных 3,5 м; 3,0 м; 2,5 м; 2,0 м при необходимом кванте контроля в пределах 0,1...0,2 м, минимально возможные размеры оптического диска преобразователя, а также количество его зубцов (рис.П.3.1) определим из последующей методики расчета.

Определим необходимую градусную меру дуги длиной (необходимый минимальный квант контроля перемещения) для указанных выше диаметров барабанов по формуле /78/

$$\gamma^\circ = \frac{360 \cdot P}{\pi \cdot D_6},$$

где γ° - число градусов в дуге; P - длина дуги, м; D_6 - диаметр барабана, м.

Наименьший диаметр рабочего отверстия оптического экрана (с учетом диаметра, например, фотодиода ФД-3А) принимаем равным $d_o = 2$ мм.

Количество отверстий с диаметром d_o , с учетом обеспечения реверсивного режима работы, должно быть равно 4, т.е. по дуге длиной P должно укладываться $4d_o$.

Диаметр оптического диска определим по формуле:

$$D_o = 2R_o = \frac{d_o}{\sin(0,125\gamma^\circ)} \text{ мм.}$$

Максимальный диаметр оптического диска

$$D_{max} = D_o + 4d_o \text{ мм.}$$

Минимальный диаметр оптического диска

$$D_{min} = D_o - 4d_o \text{ мм.}$$

Определим длину сматываемого с барабана каната за один оборот

$$l_k = \pi(D_o + d_k) \text{ м,}$$

где d_k – диаметр каната.

Определим количество зубцов оптического экрана

$$z = \frac{l_k}{p} \text{ шт.}$$

Результаты расчета оптического диска преобразователя угловых перемещений для подъемных установок с диаметрами барабана 2,0 м; 2,5 м; 3,0 м; 3,5 м и различными квантами контроля перемещения $p = 0,1$ м (0,2 м) сведены в табл.П.3.1.

Расчет конструктивных параметров рамочной антенны. В состав средств непрерывного определения местоположения подъемного сосуда может входить передающее устройство с индивидуальным источником питания.

В связи с этим экономичность передающего устройства, определяющаяся минимумом потребления энергии постоянного тока от источника, в конечном итоге приводит к повышению его эксплуатационных характеристик, так как отпадает необходимость частой смены батареи питания. Основным потребителем энергии собственно передатчика является усилитель мощности, нагрузкой которого служит колебательный контур рамочной антенны /70,80/.

Ток, подводимый к контуру рамочной антенны передатчика со стороны оконечного каскада усилителя мощности, определяется выражением /104,105/

$$I_{подв} = \frac{I}{P_k Q} \text{ МА,}$$

где I – ток в контуре РАП, обеспечивающий необходимую напряженность электромагнитного поля в точке приема; P_k – коэффициент включения усилителя в контур; Q – добротность катушки РАП.

Следовательно, при заданных I и Q для достижения минимума расхода энергии постоянного тока величина конструктивной добротности Q должна быть максимально достижимой. В то же время добротность катушки РАП /2,39,60/ определяется как:

$$Q = \frac{2\pi fL}{R_n}$$

и при заданных частоте f и индуктивности L зависит только от сопротивления активных потерь R_n . В используемом длинноволновом диапазоне частот ($f \leq 150$ кГц) они включают в себя в основном сопротивления провода катушки току высокой частоты и постоянному току и сопротивления, вносимые диэлектрическими потерями в каркасе и собственной емкостью катушки. Кроме этого, существует сложная зависимость между сопротивлением провода току высокой частоты и его диаметром, обусловленная проявлением поверхностного эффекта и эффекта близости. Эта зависимость имеет экстремум – минимум /2/.

Таким образом, задача о повышении экономичности передающего устройства, а следовательно, и об обеспечении длительной его работы при питании от источника в автономном режиме приводит к расчету наиболее выгодных параметров РАП в диапазоне частот индуктивной связи. Предлагаемая ниже методика позволяет определить оптимальные, в смысле наибольшей экономичности, конструктивные параметры контура при известных рабочей частоте и площади витков РАП /82/.

Последовательность расчета с учетом работ /2,39,60/ следующая.

Оптимальная емкость конденсатора контура РАП

$$C_{opt} = \frac{300}{f} \text{ нФ.}$$

Оптимальная индуктивность РАП

$$L_{opt} = \frac{25330}{f^2 \cdot C_{opt}} \text{ мкГн.}$$

Эквивалентный диаметр

$$D_э = \sqrt{\frac{4S_{пан}}{\pi} \cdot 10^2} \text{ мм,}$$

где $S_{пан}$ – площадь витков РАП, м².

Задаемся ориентировочной длиной намотки l_o катушки антенны в пределах 20...30 мм.

Определяется отношение $l_o/D_э$.

По зависимости $K(l/D_э)$ (здесь и далее графические зависимости и таблицы взяты из работы /2/) для числа слоев m определяется коэффициент k , учитывающий влияние размеров катушки на эффект близости.

По зависимости $L_o(l/D_э)$ находится коэффициент для числа слоев L_o .

Ориентировочное число витков антенны

$$N = \sqrt{\frac{L_{onm} \cdot 10^3}{L_o \cdot D_3}}.$$

Для определения оптимального диаметра намоточного провода необходимы вспомогательные коэффициенты

$$z' = 0,106\sqrt{f \cdot 10^6}, \quad \psi = \left(\frac{K \cdot N}{2z' D_3} \right)^2.$$

По зависимости $z_{onm}(\psi)$ определяется оптимальный коэффициент z_{onm} .
Оптимальный диаметр провода

$$d_{onm} = \frac{z_{onm}}{z'} \cdot 10 \text{ мм.}$$

Найденное значение d_{onm} округляется до ближайшего большего стандартного значения.

С учетом двухсторонней толщины изоляции обмоточного провода находится фактический диаметр

$$d_o = d_{onm} + \delta \text{ мм.}$$

Фактическая длина намотки для коэффициента неплотности α , определенного по табличной зависимости $\alpha(d_o)$,

$$l = d_o \cdot N \cdot \alpha \cdot 10^{-2} \text{ мм.}$$

Индуктивность катушки РАП

$$L = L_o \cdot N^2 \cdot D_3 \cdot 10^{-3} \text{ мГн.}$$

Уточняется количество витков

$$N' = N \sqrt{L_{onm} / L}.$$

Определяется уточненная длина намотки

$$l = N' d_o \alpha \cdot 10^2 \text{ мм}$$

Если выполняется условие

$$\frac{|L - L_{onm}|}{L_{onm}} \leq \Delta,$$

где Δ - требуемая точность, то продолжается расчет или повторяется расчет до выполнения условия с учетом нового соотношения l/D_3

Сопротивление провода постоянному току

$$R_o = \frac{70 \cdot D_3 \cdot N \cdot 10^{-5}}{d_{2onm}} \text{ Ом.}$$

Вспомогательный коэффициент

$$z = 0,106 \cdot d_{onm} \sqrt{f \cdot 10^6}.$$

По таблице коэффициентов $F(z)$ и $G(z)$ находятся их значения для полученного вспомогательного коэффициента z .

Сопротивление провода току высокой частоты

$$R_f = R_o [F(z) + \left(\frac{K \cdot N \cdot d_{onm}}{20D_3} \right)^2 G(z)] \text{ Ом.}$$

Собственная емкость катушки РАП

$$C_o = \frac{\pi \cdot D_3}{8,3 \cdot \lg(\alpha + \sqrt{\alpha^2 - 1})} \text{ нФ.}$$

Предполагая намотку катушки РАП на гладкий каркас, емкость через диэлектрик составит

$$C_{od} = \frac{C_o}{1 + 1/a \cdot E} \text{ нФ.}$$

где a – коэффициент, зависящий от конструкции намотки; E - диэлектрическая проницаемость каркаса.

Сопротивление, вносимое диэлектрическими потерями

$$R_{od} = 0,025 \cdot C_{od} \cdot \text{tg} \beta \cdot L^2 \cdot f^3 \cdot 10^{-3} \text{ Ом,}$$

где $\text{tg} \beta$ - тангенс угла потерь различных марок изоляции провода.

Полное сопротивление потерь катушки РАП

$$R_n = R_f + R_{od}.$$

Конструктивная добротность РАП

$$Q = 2\pi f / R_n$$

Учитывая значительный объем вычислений для каждого конкретного значения частоты f и площади $S_{\text{пан}}$, зависящий от заданной точности (например, для $\Delta=0,005$ требуется около 5-6 повторных расчетов) методика расчета была реализована на ЭВМ. Программа составлена на языке ФОРТРАН-4 для ЭВМ ЕС-1020, блок-схема которой приведена на рис.П.4.1. При попадании исходных данных в интервал между табличными значениями производилась линейная интерполяция. Составленная программа позволяет получать результаты как в виде таблиц (табл. П.4.1), так и в виде графиков. В таблице печатаются следующие параметры:

- площадь РАП, S ;
- сторона РАП, для случая квадратной формы антенны, a ;
- фактический диаметр провода, d_o ;
- длина намотки, ℓ ;
- число витков РАП, N ;
- эквивалентный диаметр РАП, D_3 ;
- индуктивность катушки РАП, L ;
- сопротивление провода постоянному току, R_o ;
- сопротивление, вносимое диэлектрическими потерями, R_d ;
- сопротивление провода току высокой частоты, R_f ;
- полное сопротивление потерь катушки, R_n ;
- собственная емкость катушки, C_o ;
- емкость через диэлектрик каркаса, C_{od} ;
- конструктивная добротность РАП, Q .

В виде графиков печатаются зависимости $Q(S)$, $d_o(S)$ и $L(f)$.

Данная методика позволяет определить оптимальные, в смысле минимума потребления энергии, параметры рамочных антенн передающих устройств, работающих на частотах менее 150 кГц /49,104/.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили оптимальность рассчитанных конструктивных параметров антенн. Предлагаемая методика использована при разработке передающих устройств – средств повышения безопасности эксплуатации подъемных установок /49,80,82/.

Выводы

1. Основной причиной аварий на подъемных установках является отсутствие совершенных средств защиты, выполненных на основе непрерывных и непосредственных способов определения положения сосудов в стволе.

Применение микроЭВМ в устройствах защиты способствует повышению их надежности, точности, гибкости и универсальности.

2. Основными требованиями, предъявляемыми к средствам непрерывного определения положения сосудов и защиты от превышения скорости и переподъема, являются:

- формирование реверсивной и дискретной информации с точностью 0,025 м в диапазоне перемещений до 3000 м;
- быстрдействие – не хуже 0,1 с;
- надежность (вероятность безотказной работы в течение 720 ч) – $P_{(720)} > 0,9$.

3. Использование в качестве преобразователя линейных перемещений неоднородной петлевой линии для непрерывного определения положения сосудов в стволе обеспечивает качественное решение вопросов защиты подъемов от аварийных режимов.

4. Предложен способ осуществления реверсивного режима работы преобразователя линейных перемещений сосудов в стволе.

5. Предложены методики расчета технически оптимальных конструктивных параметров преобразователя угловых перемещений и рамочной антенны средств защиты.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПОДЪЕМНОГО СОСУДА

Неоднородная петлевая линия (НПЛ) /70,71/, рассматриваемая в качестве преобразователя линейных перемещений движущегося объекта (подъемного сосуда), в общем случае состоит (рис.3.1) из двух короткозамкнутых на конце проводников тока 1, расстояние между которыми чередуется расширениями 2 и сужениями 3 (рис.3.1а,б) или перекрещиваниями 4 (рис.3.1в) с определенным шагом M вдоль ее длины. Неоднородности (расширение, сужение, перекрещивания) НПЛ, кроме форм, показанных на рис.3.1, могут быть также прямоугольными, треугольными, эллипсоидными, овальными и т.д. /71/. Если вдоль НПЛ (рис.3.1а) на некотором расстоянии l от ее плоскости перемещать рамочную антенну 5 передатчика (РАП), излучающую электромагнитную энергию и ориентированную соответствующим образом в сторону НПЛ, то благодаря направленным свойствам и параметрам РАП и НПЛ, как передающей и приемной антенн, на выходе последней будет существовать чередующаяся (в соответствии с шагом M), наводимая эдс, определенной амплитуды, формы и фазы в зависимости от местоположения РАП.

Как показывает обзор и анализ отечественной и зарубежной литературы (разд.1,2), вопросы определения местоположения движущегося объекта решаются в основном на уровне изобретений, при этом аналитические исследования свойств НПЛ как преобразователя перемещения в публикациях освещены недостаточно полно /82/. Кроме того, практически отсутствуют сведения по применению НПЛ в условиях ствола шахты. По существу, данная работа является первой попыткой использования НПЛ в качестве датчика местоположения подъемного сосуда для целей комплексной автоматизации и повышения безопасности эксплуатации подъемных установок, однако, возможности ее использования значительно шире /71/.

В основе исследования лежит общий метод определения наводимой эдс, в зоне индукции, согласно которому интегрирование электрической составляющей электромагнитного поля РАП производится по участкам заданного контура неоднородностей НПЛ, в зависимости от местоположения РАП относительно НПЛ. Идея и практическое применение методов расчета электромагнитного поля подробно изложены в работах /21,27,30,51,104,105/.

3.1. Аналитическое исследование преобразователя перемещения сосуда с использованием неоднородных линий

Вывод основного уравнения эдс, наводимой в нескрещенной НПЛ при перемещении РАП. Для выяснения закона изменения эдс, наводимой в НПЛ, рассмотрим взаимодействие в зоне индукции РАП и НПЛ (первоначально одной из ее неоднородностей) при их относительном взаимноперпендикулярном расположении, схема которого приведена на рис.3.2. При таком расположении РАП и НПЛ в наведении эдс участвуют лишь вертикальные неоднородности, а электрическая составляющая поля РАП с учетом /70/ имеет вид:

$$E_{\alpha} = \frac{k}{r^2} \sin \theta, \quad (3.1)$$

где k – коэффициент, $k = \overline{\omega} \mu_a ISN / 4\pi$, В·м; ω – угловая частота, c^{-1} ; μ_a – абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м; I – ток, текущий по виткам РАП, А; S – площадь витков РАП, м²; N – количество витков РАП; r – расстояние от центра РАП до точки наблюдения, м; $\sin \theta$ – коэффициент диаграммы направленности РАП.

На схемах рис.3.2 приняты следующие обозначения: l – фиксированное расстояние от центра РАП до плоскости неоднородности НПЛ; l_m l_n – текущие расстояния от центра РАП до точек симметрии вертикальных сторон НПЛ mm' и nn' соответственно; r_m , r_n – текущие значения радиусов РАП в произвольных точках N_m и N_n вертикальных сторон; α_m , α_n – произвольные углы между l_m и r_m , l_n и r_n ; $\vec{E}_{\alpha m}$, $\vec{E}_{\alpha n}$ – векторы электрических составляющих РАП в точках N_m и N_n ; \vec{E}_{zm} , \vec{E}_{zn} – векторы электрических составляющих, параллельных сторонам mm' и nn' ; θ_m , θ_n – углы между линией перемещения РАП вдоль НПЛ и l_m , l_n соответственно; x – текущее значение координаты по перемещению РАП; M – шаг неоднородности НПЛ.

С учетом (3.1) определим эдс, наводимую РАП в вертикальном проводе mm'

$$dE_m = E_{zm} dz = E_{\alpha m} \cos \alpha_m \sin \theta_m dz = \frac{k}{r_m^2} \cos \alpha_m \sin \theta_m dz \quad (3.2)$$

Выразим множители выражения (3.2) через линейные величины, произведем математические преобразования и осуществим переход к одной переменной

$$l_m = \sqrt{l^2 + x^2}; \quad (3.3)$$

$$\theta_m = \arccos \frac{x}{\sqrt{l^2 + x^2}}; \quad (3.4)$$

$$r_m = \sqrt{l^2 + x^2 + z^2}; \quad (3.5)$$

$$\cos \alpha_m = \frac{\sqrt{l^2 + x^2}}{\sqrt{l^2 + x^2 + z^2}}. \quad (3.6)$$

Подставив найденные значения (3.3)-(3.6) в (3.2), найдем

$$dE_m = k \sin(\arccos \frac{x}{\sqrt{l^2 + x^2}}) \frac{\sqrt{l^2 + x^2} dz}{(\sqrt{l^2 + x^2 + z^2})^3} \quad (3.7)$$

Интегрируя (3.7) от 0 до $\frac{\epsilon}{2}$, с учетом симметрии относительно РАП, окончательно получим

$$e_m = kB \left[\sin \left(\arccos \frac{x}{\sqrt{l^2 + x^2}} \right) \frac{\sqrt{l^2 + x^2}}{(l^2 + x^2) \sqrt{l^2 + x^2 + (\frac{\epsilon}{2})^2}} \right]. \quad (3.8)$$

Аналогично вышеизложенным рассуждениям найдем эдс в вертикальном проводе nn^1

$$dE_n = E_{zn} dz = \frac{k}{r_n^2} \cos \alpha_n \sin \theta_n dz; \quad (3.9)$$

$$l_n = \sqrt{l^2 + (M - x)^2}; \quad (3.10)$$

$$\theta_n = \arccos \frac{M - x}{\sqrt{l^2 + (M - x)^2}}; \quad (3.11)$$

$$r_n = \sqrt{l^2 + (M - x)^2 + z^2}; \quad (3.12)$$

$$\cos \alpha_n = \frac{M - x}{\sqrt{l^2 + (M - x)^2}}. \quad (3.13)$$

Подставив (3.10)-(3.13) в (3.9) и также проинтегрировав от 0 до $\frac{\epsilon}{2}$, получим

$$e_n = kB \left[\sin \left(\arccos \frac{M - x}{\sqrt{l^2 + (M - x)^2}} \right) \frac{\sqrt{l^2 + (M - x)^2}}{[l^2 + (M - x)^2] \sqrt{l^2 + (M - x)^2 + (\frac{\epsilon}{2})^2}} \right]. \quad (3.14)$$

Так как векторы электрических составляющих, участвующих в наведении эдс в вертикальных проводах e_m и e_n , направлены в контуре навстречу друг другу, то общая эдс, наведенная в неоднородности НПЛ, будет равна

$$e_{mn} = /e_m - e_n/. \quad (3.15)$$

Таким образом, закон изменения действующего значения наведенной эдс в неоднородности НПЛ при перемещении РАП по координате x с учетом (3.8), (3.14) и (3.15) запишется в виде:

$$e_{mn} = kB \left\{ \sin \left(\arccos \frac{x}{\sqrt{l^2 + x^2}} \right) \frac{\sqrt{l^2 + x^2}}{(l^2 + x^2) \sqrt{l^2 + x^2 + (\epsilon/2)^2}} - \right. \\ \left. - \sin \left(\arccos \frac{M - x}{\sqrt{l^2 + (M - x)^2}} \right) \frac{\sqrt{l^2 + (M - x)^2}}{[l^2 + (M - x)^2] \sqrt{l^2 + (M - x)^2 + (\epsilon/2)^2}} \right\} /. \quad (3.16)$$

Предварительный анализ полученного выражения показывает, что при изменении x величина эдс на выходе неоднородности НПЛ изменяется по синусоидальному закону, причем в точках $x=0$ и $x=M$ имеет место максимум эдс, а при $x=M/2$ – минимум (нулевая) эдс. Из выражения (3.16) также следует, что уровень эдс не зависит от скорости перемещения РАП, а определяется координатой x при соответствующих постоянных k, l, m, ϵ .

Вывод основного уравнения эдс, наводимой в скрещенной НПЛ при перемещении РАП. Важным элементом скрещенной НПЛ являются ее наклонные и пересекающиеся (скрещивающиеся) в плоскости НПЛ проводники, образующие так называемые фазовые центры (рис.3.1в). При расположении РАП симметрично фазового центра скрещенной НПЛ в последней наводится минимум эдс. При дальнейшем перемещении РАП вдоль НПЛ происходит переворот фазы наводимого сигнала /69,82/ и увеличение его до своего максимального значения, определяемого местоположением РАП относительно расширения неоднородности.

Первоначально расчет наводимой эдс в неоднородности скрещенной НПЛ выполним для случая, когда плоскость РАП совмещена с плоскостью НПЛ (рис.3.3б), а окончательный результат получим после параллельного переноса РАП из плоскости НПЛ на расстояние L (рис.3.3а) и с учетом коэффициента диаграммы направленности $\sin \theta$ РАП. В связи с тем, что расчет наводимой РАП эдс в наклонных проводниках РАП имеет ряд особенностей, рассмотрим этот случай более подробно. На рис.3.4 показан фазовый центр, образованный проводниками $1-1'$ и $2-2'$ с углами наклона к оси абсцисс φ и $-\varphi$ соответственно, а РАП расположена симметрично и отстоит от фазового центра на расстоянии x . Согласно расчетной схеме (рис.3.4), имеем

$$E_z = E_a \cos \Omega, \quad (3.17)$$

а дифференциал наводимой РАП эдс в проводе $1-1'$ (на участке $0-1$) определится

$$dE_{0-1} = \frac{k}{r^2} \cos \Omega \, dz \quad (3.18)$$

Из построения следует, что сумма углов α, Ω, Ψ , заключенных между осями координат, равна

$$\alpha + \Omega + \psi = 90^\circ, \quad (3.19)$$

откуда

$$90^\circ - \Omega = \alpha + \psi. \quad (3.20)$$

Следовательно, с учетом (3.20)

$$\cos \Omega = \sin(90^\circ - \Omega) = \sin(\alpha + \psi). \quad (3.21)$$

Докажем справедливость выражения (3.21) в произвольной точке N на участке наклонного проводника НПЛ. Согласно рис.3.5, найдем

$$\begin{aligned} NP_1 &= \frac{z \sin \psi}{\cos \alpha}; \\ N_1 P_1 &= NP_1 \sin \alpha = z \sin \psi \operatorname{tg} \alpha; \\ OP_1 &= ON_1 - P_1 N_1 = z (\cos \psi - \sin \psi) \operatorname{tg} \alpha; \\ OP &= OP_1 \cos \psi = z \cos \psi (\cos \psi - \sin \psi \operatorname{tg} \alpha); \\ NP &= z - OP = z [1 - \cos \psi (\cos \psi - \sin \psi \operatorname{tg} \alpha)], \end{aligned}$$

следовательно,

$$\cos \Omega = \frac{NP}{NP_1} = \frac{z [1 - \cos \psi (\cos \psi - \sin \psi \operatorname{tg} \alpha)]}{z \cdot \sin \psi / \cos \alpha} = \sin(\alpha + \psi).$$

Проверим выполнение условия (3.19), а, следовательно (3.20) и (3.21), для наклонного провода бесконечной длины (рис.3.6). Для этого достаточно рассмотреть выполнение указанного соотношения лишь в характерных точках (1), (0), (2...6), так как алгебраическая сумма углов Ω, α, Ψ в любой другой точке наклонного провода от $-\infty$ до $+\infty$ будет частным случаем одной из характерных точек (1), (2), (4), (6) на участках $(-\infty) - 0, 0-3, 3-5, 5-(+\infty)$ соответственно.

Согласно построений (рис.3.5), в характерных точках имеем

$$\begin{aligned} (1) \quad & \Omega_1 - (-\alpha_1) + \psi = 90^\circ; \\ (0) \quad & \Omega_0 + \alpha_0 + \psi = 90^\circ, \quad \text{при } \alpha_0 = 0^\circ; \\ (2) \quad & \Omega_2 + \alpha_2 + \psi = 90^\circ; \\ (3) \quad & \Omega_3 + \alpha_3 + \psi = 90^\circ; \quad \text{при } \alpha_3 = 0^\circ; \\ (4) \quad & \Omega_4 + (90^\circ - \alpha_4) + (90^\circ - \psi) = 90^\circ; \\ (5) \quad & \Omega_5 + (\alpha_5 - 90^\circ) + (90^\circ - \psi) = 90^\circ, \quad \text{при } \alpha_5 = 90^\circ; \\ (6) \quad & \Omega_6 - \alpha_6' + (90^\circ - \psi) = \Omega_6 + (90^\circ - \alpha_6) + (90^\circ - \psi_6) = 90^\circ, \quad \text{при } \alpha_6 = (90^\circ + \alpha_6'). \end{aligned} \quad (3.22)$$

Подставляя полученные соотношения (3.22) в (3.21), предварительно преобразовав их с учетом (3.20), легко убедиться в выполнении указанного условия при изменении угла от $-\alpha_{\max}$ до $+\alpha_{\max}$.

Рассуждая аналогичным образом, можно показать, что условие (3.19) выполняется и для другого наклонного провода НПЛ. Таким образом, функцию $\cos \Omega$ в выражении (3.18) можно представить в виде (3.21), переменные выразить через параметр α

Обращаясь к рис. 3.4, определим

$$r = \frac{x - z \cos \psi}{\cos \alpha}, \quad (3.23)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{z \sin \psi}{x - z \cos \psi}. \quad (3.24)$$

Дифференцируя левую и правую части выражения (3.24), получим

$$(\operatorname{tg} \alpha)' = \frac{1}{\cos^2 \alpha} d\alpha, \quad (3.25)$$

$$\left(\frac{z \sin \psi}{x - z \cos \psi} \right)' = \frac{x \sin \psi \, dz}{(x - z \cos \psi)^2}.$$

Подставляя производные (3.25), выделим элемент длины

$$dz = \frac{(x - z \cos \psi)^2}{\cos^2 \alpha \cdot x \sin \psi}. \quad (3.26)$$

Подставляя полученные выражения (3.21), (3.23), (3.26) в уравнение (3.16), получим

$$dE_{0-1} = \frac{k}{x \sin \psi} \sin(\alpha + \psi) d\alpha. \quad (3.27)$$

Согласно рис.3.4, переменный угол α на участке $0-1$ наклонного провода $I-I'$ изменяется от 0 до $\alpha_{2\psi}$. Интегрируя выражение (3.27) с учетом этих пределов, определим наводимую эдс

$$\begin{aligned} e_{0-1} &= \frac{k}{x \cdot \sin \psi} \int_0^{\alpha_{2\psi}} \sin(\alpha + \psi) d\alpha = \\ &= \frac{k}{x} \left[\frac{1 - \cos \alpha_{2\psi}}{\operatorname{tg} \psi} + \sin \alpha_{2\psi} \right]. \end{aligned} \quad (3.28)$$

Эдс, наводимую на участке $0-1'$ наклонного провода $I-I'$, определим аналогичным образом, интегрируя уравнение (3.27) от $-\alpha_{2\psi}$ до 0 , т.е.

$$\begin{aligned} e_{0-1'} &= \frac{k}{x \sin \psi} \int_{-\alpha_{2\psi}}^0 \sin(\alpha + \psi) d\alpha = \\ &= \frac{k}{x} \left[\cos \alpha_{1\psi} - \frac{1}{\operatorname{tg} \psi} + \sin \alpha_{1\psi} \right]. \end{aligned} \quad (3.29)$$

Суммируя выражения (3.28) и (3.29), получим расчетную формулу для определения эдс, наводимую РАП в наклонном проводе $I-I'$ НПЛ (в плоскости) в зависимости от положения РАП на оси OX

$$e_{1-1'} = e_{0-1} + e_{0-1'} = \frac{k}{x} \left[\frac{\cos \alpha_{1\psi} - \cos \alpha_{2\psi}}{\operatorname{tg} \psi} + (\sin \alpha_{1\psi} + \sin \alpha_{2\psi}) \right] \quad (3.30)$$

Величину эдс, наводимую на участках $0-2$ и $0-2'$ наклонного проводника $2-2'$, получим на основании следующих рассуждений. Из построений (рис.3.3) имеем

$$\begin{aligned} -\alpha_{1\psi} &= +\alpha_2(-\alpha), \\ -\alpha_1(-\psi) &= +\alpha_2(\psi). \end{aligned} \quad (3.31)$$

Следовательно, пределы интегрирования для участков $0-2$ и $0-2'$ такие же, что и для участков $0-1'$ и $0-1$ соответственно. Таким образом, можно записать

$$\left. \begin{aligned} e_{0-1} &= e_{0-2'}, \\ e_{0-1'} &= e_{0-2}, \\ e_{1-1'} &= e_{2-2'}. \end{aligned} \right\} \quad (3.32)$$

Расчет наводимой эдс в горизонтальных проводниках НПЛ на участках $1-2$ и $5-4$ (рис.3.3б) произведем по изложенной выше методике, при этом в выражении (3.17) $\cos \Omega = \cos \alpha$, т.к. угол наклона симметричных участков $1-2$ и $5-4$ отсутствует и РАП отстоит от указанных проводников на расстоянии ϱ .

Следовательно,

$$dE_{1-2} = dE_{5-4} = \frac{k}{r^2} \cos \alpha dz. \quad (3.33)$$

Так как $\operatorname{tg} \alpha = \frac{2z}{\varrho}$, то, выполнив дифференцирование левой и правой частей этого выражения и выделив элемент длины, получим

$$dz = \frac{\varrho}{2 \cos^2 \alpha} d\alpha. \quad (3.34)$$

Выразим радиус r через переменный параметр α

$$r = \frac{\varrho}{2 \cos \alpha}. \quad (3.35)$$

Подставив в (3.33) полученные выражения (3.34) и (3.35) и интегрируя от $-\alpha_3$ до $+\alpha_4$, окончательно получим

$$e_{1-2} = e_{5-4} = 2 \frac{k}{\varrho} \int_{-\alpha_3}^{\alpha_4} \cos \alpha d\alpha = 2 \frac{k}{\varrho} (\sin \alpha_3 + \sin \alpha_4). \quad (3.36)$$

Эдс, наводимую на участках $2-3$ и $3-4$, определим по полученной формуле (3.26) путем замены x на $(M-x)$ и с учетом углов α_5 и α_6 , т.е.

$$e_{1-2} = e_{3-4} = \frac{k}{M-x} \left(\frac{1-\cos\alpha_5}{\operatorname{tg}\psi} + \sin\alpha_5 \right) = \frac{k}{M-x} \left(\frac{1-\cos\alpha_6}{\operatorname{tg}\psi} + \sin\alpha_6 \right). \quad (3.37)$$

С учетом выражения (3.28) найдем ε_{dc} , наводимую на симметричных участках 5-0 и 0-1 соответственно

$$e_{5-0} = e_{0-1} = \frac{k}{\varepsilon} \left(\frac{1-\cos\alpha_1}{\operatorname{tg}\psi} + \sin\alpha_1 \right) = \frac{k}{x} \left(\frac{1-\cos\alpha_2}{\operatorname{tg}\psi} + \sin\alpha_2 \right). \quad (3.38)$$

Общее действующее значение ε_{dc} , наводимой РАП в плоскости неоднородности НПЛ, найдется как сумма ε_{dc} участков 0-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-0. С учетом полученных выражений (3.36), (3.37), (3.38) определим

$$e_{o(nz)} = 2e_{0-1} + 2e_{1-2} + 2e_{2-3} = 2k \left[\frac{1}{x} \left(\frac{1-\cos\alpha_1}{\operatorname{tg}\psi} + \sin\alpha_1 \right) + \frac{2}{\varepsilon} (\sin\alpha_3 + \sin\alpha_4) + \frac{1}{M-x} \left(\frac{1-\cos\alpha_5}{\operatorname{tg}\psi} + \sin\alpha_5 \right) \right]. \quad (3.39)$$

Так как, согласно рис.3.36,

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= \operatorname{arctg} \frac{\varepsilon/2}{x-a/2}, \\ \alpha_3 &= \operatorname{arctg} \frac{\varepsilon/2}{x-a/2}, \\ \alpha_4 &= \operatorname{arctg} \frac{\varepsilon/2}{(M-x)-a/2}, \\ \alpha_5 &= \operatorname{arctg} \frac{\varepsilon/2}{(M-x)-a/2}, \\ \operatorname{tg}\varphi &= \varepsilon/a, \end{aligned} \right\} \quad (3.40)$$

то, подставляя (3.40) в (3.39), получим выражение, удобное для анализа закона изменения ε_{dc} в неоднородности скрещенной НПЛ при перемещении РАП

$$e_{o(nz)} = 2k \left\{ \frac{1}{x} \left[\frac{a}{\varepsilon} \left(1 - \cos \operatorname{arctg} \frac{\varepsilon/2}{x-a/2} \right) + \sin \operatorname{arctg} \frac{\varepsilon/2}{x-a/2} \right] + \frac{1}{\varepsilon/2} \left[\sin \operatorname{arctg} \frac{\varepsilon/2}{x-a/2} + \sin \operatorname{arctg} \frac{\varepsilon/2}{(M-x)-a/2} \right] + \frac{1}{M-x} \left[\frac{a}{\varepsilon} \left(1 - \cos \operatorname{arctg} \frac{\varepsilon/2}{(M-x)-a/2} \right) + \sin \operatorname{arctg} \frac{\varepsilon/2}{(M-x)-a/2} \right] \right\}. \quad (3.41)$$

При анализе полученного выражения (3.41) учитывается, что реальная РАП обладает некоторыми размерами, которые характеризуются эквивалентной площадью S_3 с эквивалентным радиусом $R_3 = \sqrt{S_3/\pi} / 13$. Следовательно,

$$x = x_o + \sqrt{S_3/\pi}, \quad (3.42)$$

где x_o – расстояние от точки наблюдения до образующей контура эквивалентной площади РАП.

При перемещении РАП в пределах $0 \leq x \leq M$ минимум наводимой ε_{dc} будет наблюдаться в точках $x=0$ или $x=M$, т.к. первое или третье слагаемое (3.41) с учетом (3.42) обращается в ноль. Таким образом, выражение (3.41) связывает основные параметры РАП и неоднородности НПЛ в предельном случае, когда $L=0$.

Рассмотрим вывод основного уравнения наводимой ε_{dc} в неоднородности НПЛ при $L \neq 0$. Согласно расчетной схеме (рис.3.7), РАП отстоит от плоскости проводников неоднородности НПЛ на расстоянии L , причем случай, когда РАП совмещена с плоскостью неоднородностей НПЛ, показан штриховыми линиями. В целях простоты, необходимые построения выполнены лишь для участков 0-1 и 1-2 неоднородности НПЛ, а обозначения элементов расчетной схемы оставлены прежними. Особенностью рассматриваемого случая является тот факт, что вектор E_α в любой произвольной точке $N(N')$ наклонного (горизонтального) провода НПЛ всегда перпендикулярен плоскости $ON\mathcal{O}$ ($ON'\mathcal{O}$) и лежит в плоскости РАП /82/. В силу указанного обстоятельства вывод интересующего нас уравнения произведем с учетом следующих соотношений:

$$\frac{r}{r_1} = \sin\theta, \quad (\text{для участка } 0-1) \quad (3.43)$$

$$\frac{r^1}{r_1^1} = \sin\theta^1, \quad (\text{для участка } 1-2) \quad (3.44)$$

Таким образом, дифференциал наводимой РАП εds в точке N на участке $0-1$ наклонного провода НПЛ с учетом выражений (3.17) и (3.43) запишется в виде

$$dE_{0-1} = \frac{k}{r_{21}} \cos \Omega \frac{r}{r_1} dz. \quad (3.45)$$

Так как $r_1 = \sqrt{r^2 = L^2}$, $\cos \Omega = (\alpha + \psi)$ то, подставляя полученные соотношения в (3.45), получим

$$dE_{0-1} = k \left[\frac{r}{\sqrt{(r^2 = L^2)^3}} (\cos \alpha \sin \psi + \sin \alpha \cos \psi) dz \right]. \quad (3.46)$$

Выразим переменные, входящие в (3.46), через параметр z

$$r = \sqrt{(NN_1)^2 + (00_1 - ON)^2} = \sqrt{(z \sin \psi)^2 + (x - z \cos \psi)^2}; \quad (3.47)$$

$$\cos \alpha = \frac{00_1 - ON_1}{r} = \frac{x - r \cos \psi}{r}; \quad (3.48)$$

$$\sin \alpha = \frac{NN_1}{r} = \frac{z \sin \psi}{r}. \quad (3.49)$$

Подставив (3.47)-(3.49) в (3.46) и произведя некоторые математические преобразования, получим

$$dE_{0-1} = k x \sin \psi \left[\frac{dz}{\sqrt{[z^2 - z(2x \cos \psi) + L^2]^3}} \right]. \quad (3.50)$$

Интегрируя (3.50) от 0 до $\varepsilon/2 \sin \psi$, определим

$$e_{0-1} = \frac{k x \sin \psi}{L^2 + (x \sin \psi)^2} \left[\frac{\frac{\varepsilon}{2 \sin \psi} - x \cos \psi}{\sqrt{\left(\frac{\varepsilon}{2 \sin \psi}\right)^2 - \frac{x \varepsilon}{\operatorname{tg} \psi} + L^2 + x^2}} \right]. \quad (3.51)$$

Рассуждая аналогичным образом, определим εds , наводимую РАП на участке $1-1'$ (аналогичного рис.3.4) НПЛ. В этом случае, интегрируя напряжение (3.50) от $\varepsilon/2 \sin \psi$ до 0 , найдем

$$e_{0-1'} = \frac{k x \sin \psi}{L^2 + (x \sin \psi)^2} \left[\frac{\frac{\varepsilon}{2 \sin \psi} + x \cos \psi}{\sqrt{\left(\varepsilon/2 \sin \psi\right)^2 + \frac{x \varepsilon}{\operatorname{tg} \psi} + L^2 + x^2}} \right]. \quad (3.52)$$

По аналогии с (3.30), суммируя выражение (3.51) и (3.52), получим расчетную формулу для определения εds , наводимую РАП в наклонном проводе $1-1'$ НПЛ (в пространственно-параллельных плоскостях)

$$e_{1-1'(np)} = \frac{k x \sin \psi}{L^2 + (x \sin \psi)^2} \left[\frac{\varepsilon/2 \sin \psi - x \cos \psi}{\sqrt{\left(\varepsilon/2 \sin \psi\right)^2 - \frac{x \varepsilon}{\operatorname{tg} \psi}} + \frac{\varepsilon/2 \sin \psi + x \cos \psi}{\sqrt{\left(\varepsilon/2 \sin \psi\right)^2 + \frac{x \varepsilon}{\operatorname{tg} \psi} + L^2 + x^2}} \right]. \quad (3.53)$$

Очевидно также, что и при пространственно-параллельном расположении РАП и НПЛ форма записи уравнений (3.32) остается той же и для определения наводимой εds на других участках скрещенных проводников $1-1$ и $2-2$ НПЛ.

Согласно рис.3.7, дифференциал наводимой РАП εds в точке N' на участке $1-2$ горизонтального провода неоднородности НПЛ, в соответствии с выражениями (3.33) и (3.44), имеет вид

$$dE_{1-2} = \frac{k}{(r_1^1)^2} \cos \alpha^1 \frac{r^1}{r_1^1} dz. \quad (3.54)$$

Так как

$$\left. \begin{aligned} r_1^1 &= \sqrt{(r^1)^2 + L^2} \\ r^1 &= \sqrt{z^2 + (\varepsilon/2)^2} \\ \cos \alpha^1 &= \frac{\varepsilon/2}{r^1} \end{aligned} \right\}, \quad (3.55)$$

то, подставив выражения (3.55) (3.54) и выполнив необходимые преобразования, получим

$$dE_{1-2} = \frac{k \varepsilon / 2 dz}{\sqrt{[z^2 + (\varepsilon/2)^2 + L^2]^3}}, \quad (3.56)$$

Проинтегрировав выражение (3.56) от $-(x-a/2)$ до $(M-x)-a/2$, найдем

$$e_{1-2} = \frac{k\vartheta/2}{L^2 + (\vartheta/2)^2} \left[\frac{x-a/2}{\sqrt{(x-a/2)^2 + (\vartheta/2)^2 + L^2}} + \frac{(M-x)-a/2}{\sqrt{[(M-x)-a/2]^2 + (\vartheta/2)^2}} \right] \quad (3.57)$$

Очевидно, эдс, наводимую РАП на участке 2-3 (рис.3.3а) провода неоднородности НПЛ, определим путем тех же рассуждений, принятых для участка $O-I$ (рис.3.7), заменив в выражении (3.51) x на $M-x$.

Тогда

$$e_{2-3} = \frac{k(M-x)\sin\psi}{L^2 + [(M-x)\sin\psi]^2} \left[\frac{\vartheta/2\sin\psi - (M-x)\cos\psi}{\sqrt{(\vartheta/2\sin\psi)^2 - (M-x)\vartheta/\operatorname{tg}\psi + L^2 + (M-x)^2}} + \frac{(M-x)\cos\psi}{\sqrt{L^2 + (M-x)^2}} \right] \quad (3.58)$$

Общее действующее значение эдс, наводимой РАП в (пространстве) неоднородности НПЛ с учетом (3.52), (3.57) и (3.58), определится

$$\begin{aligned} e_{o(np)} &= 2(e_{0-1}) + 2(e_{1-2}) + 2(e_{2-3}) = \\ &= 2k \left\{ \frac{x\sin\psi}{L^2 + (x\sin\psi)^2} \left[\frac{\vartheta/2\sin\psi - x\cos\psi}{\sqrt{(\vartheta/2\sin\psi)^2 - x\vartheta/\operatorname{tg}\psi + L^2 + x^2}} + \frac{x\cos\psi}{\sqrt{L^2 + x^2}} \right] + \right. \\ &+ \frac{\vartheta/2}{L^2 + (\vartheta/2)^2} \left[\frac{x-a/2}{\sqrt{(x-a/2)^2 + (\vartheta/2)^2 + L^2}} + \frac{(M-x)-a/2}{\sqrt{[(M-x)-a/2]^2 + (\vartheta/2)^2 + L^2}} \right] + \\ &+ \frac{(M-x)\sin\psi}{L^2 + [(M-x)\sin\psi]^2} \left[\frac{\vartheta/2\sin\psi - (M-x)\cos\psi}{\sqrt{(\vartheta/2\sin\psi)^2 - (M-x)\vartheta/\operatorname{tg}\psi + L^2 + (M-x)^2}} + \right. \\ &\left. \left. + \frac{(M-x)\cos\psi}{\sqrt{L^2 + (M-x)^2}} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (3.59)$$

Соответствие формул (3.41) и(3.59) легко проверить, так как при $L=0$ в выражении (3.59) $e_{o(np)}=e_{o(nl)}$. Как следует из полученной формулы (3.59), при перемещении РАП в пределах $0 \leq x \leq M$, минимум эдс, наводимой в неоднородности НПЛ, будет иметь место на концах интервала шага M , а максимум эдс на середине этого интервала; уровень наводимой эдс также не зависит от скорости перемещения РАП и обусловлен лишь координатой x при соответствующих неизменных величинах k, L, M, ϑ .

Исследование и определение эдс, наводимой в НПЛ при расположении РАП в характерных точках.

В общем случае НПЛ состоит из совокупности неоднородностей. В связи с этим распространим выражение (3.16), считая, что слева и справа от неоднородности (см. рис.3.2) расположено бесконечное количество расширений, чередующихся с сужениями с шагом M .

Тогда выражение для эдс, наводимой РАП в НПЛ при их взаимно-перпендикулярном расположении, запишется в виде:

$$\begin{aligned} e_{нпл} &= (e_m - e_n) + \sum_{i=1}^{i=-\infty} (e_{ni} - e_{mi}) + \sum_{i=1}^{i=+\infty} (e_{mi} - e_{ni}) = \\ &= k\vartheta \left\{ \left[\sin(\arccos \frac{x}{\sqrt{l^2 + x^2}}) \frac{\sqrt{l^2 + x^2}}{(l^2 + x^2)\sqrt{l^2 + x^2 + (\vartheta/2)^2}} - \right. \right. \\ &\left. \left. - \sin(\arccos \frac{M-x}{\sqrt{l^2 + (M-x)^2}}) \frac{\sqrt{l^2 + (M-x)^2}}{[l^2 + (M-x)^2]\sqrt{l^2 + (M-x)^2 + (\vartheta/2)^2}} \right] + \right. \\ &+ \sum_{i=1}^{i=-\infty} \left[\sin(\arccos \frac{x + (2i-1)M}{\sqrt{l^2 + [x + (2i-1)M]^2}}) \frac{\sqrt{l^2 + [x + (2i-1)M]^2}}{l^2 + [x + (2i-1)M]^2} \right] \times \\ &\times \frac{1}{\sqrt{l^2 + [x + (2i-1)M]^2 + (\vartheta/2)^2}} - \sin(\arccos \frac{x + (2i)M}{\sqrt{l^2 + [x + (2i)M]^2}}) \times \\ &\times \frac{\sqrt{l^2 + [x + (2i)M]^2}}{(l^2 + [x + (2i)M - x]^2)\sqrt{l^2 + [x + (2i)M]^2 + (\vartheta/2)^2}} \left. \right] + \\ &+ \sum_{i=1}^{i=+\infty} \left[\sin(\arccos \frac{(2i)M - x}{\sqrt{l^2 + [(2i)M - x]^2}}) \times \right. \\ &\times \frac{\sqrt{l^2 + [(2i)M - x]^2}}{(l^2 + [(2i)M - x]^2)\sqrt{l^2 + [(2i)M - x]^2 + (\vartheta/2)^2}} - \sin(\arccos \frac{(2i+1)M - x}{\sqrt{l^2 + [(2i+1)M - x]^2}}) \times \\ &\left. \times \frac{\sqrt{l^2 + [(2i+1)M - x]^2}}{(l^2 + [(2i+1)M - x]^2)\sqrt{l^2 + [(2i+1)M - x]^2 + (\vartheta/2)^2}} \right], \end{aligned} \quad (3.60)$$

где $i = (1, 2, 3, \dots)$ – номер неоднородности НПЛ.

С учетом (3.60) рассмотрим нахождение наводимой ε_{dc} при различных положениях РАП относительно НПЛ. Для простоты анализа будем полагать, что шаг M расширений и сужений НПЛ одинаков, при этом длина линии равна

$$H_{нпл} = (2n-1)M, \quad (3.61)$$

где n – количество расширений.

В свою очередь, линия может содержать четное или нечетное количество расширений, обозначаемых как $n(2\kappa)$, $n(2\kappa-1)$ соответственно, где индекс $\kappa=1$. Как при взаимно-перпендикулярном, так и взаимно-параллельном относительном расположении РАП и НПЛ, наиболее характерными являются три случая местоположения РАП с точки зрения определения наводимой ε_{dc} в НПЛ:

- РАП расположена в начале (конце) НПЛ;
- РАП расположена симметрично относительно расширения и НПЛ;
- РАП расположена симметрично сужения (перекрещивания) и НПЛ.

Согласно рис.3.8, характеризующему первый случай, в соответствии с (3.60)

$$e_{нпл} = [(e_{m_0} - e_{n_0}) + \sum_{i=1}^{i=H_{нпл}} (e_{m_i} - e_{n_i})] \neq 0, \quad (3.62)$$

для $H_{нпл}$, содержащей $n(2\kappa)$, либо $n(2\kappa-1)$ расширений. При этом направление действующих значений ε_{dc} e_o , e_b , e_n во всех контурах соответствующих расширений одинаково (от вертикальных сторон проводников m_o , m_b , m_n к вертикальным проводникам n_o , n_b , n_n , при этом $e_o > e_b > e_n$). Очевидно, при расположении РАП в конце НПЛ ($x=H_{нпл}$), выражение для наводимой ε_{dc} запишется

$$e_{нпл} = (e_{n_n} - e_{m_n}) + \sum_{i=1}^{i=H_{нпл}} (e_{n_i} - e_{m_i}) \neq 0. \quad (3.63)$$

Выражение (3.63) эквивалентно (3.62), с той лишь разницей, что направление e_o , e_b , e_n меняется на противоположное и $e_n > e_b > e_o$.

Таким образом, полагая в (3.60) $x=0$, с учетом (3.62) и (3.61) определим расчетную величину ε_{dc} , наводимую в НПЛ

$$\begin{aligned} e_{нпл} = \kappa\theta \{ & \left[\frac{1}{l\sqrt{l^2 + (\theta/2)^2}} - \sin(\arccos \frac{M}{\sqrt{l^2 + M^2}}) \right] \times \\ & \times \frac{\sqrt{l^2 + M^2}}{(l^2 + M^2)\sqrt{l^2 + M^2 + (\theta/2)^2}} + \sum_{i=1}^{i=H_{нпл}} \left[\sin(\arccos \frac{(2i)M}{\sqrt{l^2 + [(2i)M]^2}}) \right] \times \\ & \times \frac{\sqrt{l^2 + [(2i+1)M]^2}}{(l^2 + [(2i)M]^2)\sqrt{l^2 + [(2i)M]^2 + (\theta/2)^2}} - \\ & - \sin(\arccos \frac{(2i+1)M}{\sqrt{l^2 + [(2i+1)M]^2}}) \frac{\sqrt{l^2 + [(2i+1)M]^2}}{(l^2 + [(2i+1)M]^2)\sqrt{l^2 + [(2i+1)M]^2 + (\theta/2)^2}} \Big], \end{aligned} \quad (3.64)$$

где $i=1,2,3\dots n$.

Согласно рис.3.9, характеризующему второй случай, для $H_{нпл}$, содержащей $n(2\kappa-1)$ расширений

$$\begin{aligned} e_{нпл} &= (e_m - e_n) + \sum_{i=1}^{i=H_{нпл}} (e_{m_i} - e_{n_i}) + \sum_{i=1}^{i=H_{нпл}} (e_{n_i} - e_{m_i}) = \\ &= (e_m - e_n) + \sum_{i=1}^{i=H_{нпл}} [(e_{m_i} - e_{n_i}) + (e_{n_i} - e_{m_i})] = 0. \end{aligned} \quad (3.65)$$

Равенство нулю наводимой ε_{dc} в НПЛ в выражении (3.65) обеспечивается равенством встречных направлений ε_{dc} в вертикальных проводниках расширений, расположенных как слева, так и справа от РАП, в том числе и в расширении, располагаемом непосредственно перед РАП. В соответствии с рис.3.10, характеризующим третий случай, для $H_{нпл}$, содержащей $n(2\kappa)$ расширений

$$\begin{aligned} e_{нпл} &= \sum_{i=1}^{i=H_{нпл}} (e_{n_i} - e_{m_i}) + \sum_{i=1}^{i=H_{нпл}} (e_{m(i+1)} - e_{n(i+1)}) = \\ &= \sum_{i=1}^{i=H_{нпл}} [(e_{n_i} - e_{m_i}) + (e_{m(i+1)} - e_{n(i+1)})] = 0. \end{aligned} \quad (3.66)$$

Равенство нулю наводимой ε_{dc} в НПЛ в выражении (3.66) обеспечивается равенством встречных направлений ε_{dc} в вертикальных проводниках расширений, расположенных слева и справа от РАП.

Прежде, чем распространить вышеприведенные рассуждения для неоднородностей скрещенной НПЛ, рассмотрим общее правило нахождения наводимой ε_{dc} при взаимно-параллельном расположении РАП и НПЛ. Пусть мгновенные направления составляющих наводимых ε_{dc} (e_j , e_{+j} , e_{-j}) в контурах неоднородностей скрещенной НПЛ соответствуют случаю, показанному на рис.3.11, так как любой контур (например, контур с ε_{dc}

e_0) скрещенной НПЛ по отношению к непосредственно расположенному слева и справа от него контурам (контуры с эдс e_{-1} , e_{+1}) в общей цепи петлевой линии "включен" встречно (в силу перекрещивающихся проводников тока), то, совершая последовательно обход по соответствующему контуру НПЛ и производя алгебраическое суммирование составляющих эдс, наводимых РАП в НПЛ, для трех контуров, получим

$$\begin{aligned} e_{обц} = & e_{0-1} + e_{1-2} + e_{2-3} - e_{4-3} + e_{5-4} + e_{6-5} + e_{7-6} + e_{8-7} - e_{3-8} + e_{3-9} + e_{9-10} + e_{10-0} + \\ & + e_{11-0} - e_{12-11} - e_{13-12} - e_{14-13} - e_{15-14} + e_{0-15} = 2(e_{0-1} + e_{1-2} + e_{2-3}) - 2(-e_{3-8} + e_{8-7} + \\ & + e_{7-6}) - 2[-(e_{11-0} + e_{12-11} + e_{13-12})] = e_0 - e_{+1} - e_{-1}. \end{aligned} \quad (3.67)$$

В выражении (3.67) эдс e_0 , в зависимости от рассматриваемого случая, определяется по формуле (3.48) или (3.59). Эдс e_{+1} , e_{-1} определим с учетом ранее приводимых рассуждений и соотношений (3.32), (3.33), (3.37), (3.38). Согласно рис.3.11 (для $L=0$), имеем

$$\begin{aligned} e_{+1(n\pi)} = & 2(-e_{3-8} + e_{8-7} + e_{7-6}) = 2k\left\{-\frac{1}{M-x}\left[\frac{a}{\epsilon}(\operatorname{cosarctg} \frac{\epsilon/2}{(M-x)+a/2} - 1) + \right. \right. \\ & \left. \left. + \operatorname{sin arctg} \frac{\epsilon/2}{(M-x)-a/2}\right] + \right. \\ & \left. + \frac{1}{\epsilon/2}\left[\operatorname{sin arctg} \frac{\epsilon/2}{(2M-x)-a/2} - \operatorname{sin arctg} \frac{\epsilon/2}{(M-x)+a/2}\right] + \right. \\ & \left. + \frac{1}{2M-x}\left[\frac{a}{\epsilon}(1 - \operatorname{cosarctg} \frac{\epsilon/2}{(2M-x)-a/2}) + \operatorname{sin arctg} \frac{\epsilon/2}{(2M-x)-a/2}\right]\right\}. \end{aligned} \quad (3.68)$$

$$\begin{aligned} e_{-1(n\pi)} = & 2(-e_{0-11} + e_{12-11} + e_{13-12}) = \\ = & 2k\left\{-\frac{1}{x}\left[\frac{a}{\epsilon}(\operatorname{cosarctg} \frac{\epsilon/2}{x+a/2} - 1) + \operatorname{sin arctg} \frac{\epsilon/2}{x+a/2}\right] + \right. \\ & \left. + \frac{1}{\epsilon/2}\left[\operatorname{sin arctg} \frac{\epsilon/2}{(M+x)-a/2} - \operatorname{sin arctg} \frac{\epsilon/2}{x+a/2}\right] + \right. \\ & \left. + \frac{1}{M+x}\left[\frac{a}{\epsilon}(1 - \operatorname{cosarctg} \frac{\epsilon/2}{(M+x)-a/2}) + \operatorname{sin arctg} \frac{\epsilon/2}{(M+x)-a/2}\right]\right\}. \end{aligned} \quad (3.69)$$

При пространственном расположении РАП и НПЛ ($L \neq 0$) с учетом (3.51), (3.52), (3.56), (3.58) для этих условий определим

$$\begin{aligned} e_{+1(np)} = & 2(-e_{3-8} + e_{8-7} + e_{7-6}) = \\ = & 2k\left\{-\frac{(M-x)\sin\psi}{L^2 + [(M-x)\sin\psi]^2} \left[\frac{\epsilon/2\sin\psi + (M-x)\cos\psi}{\sqrt{(\epsilon/2\sin\psi)^2 + (M-x)\epsilon/\operatorname{tg}\psi + L^2 + (M-x)^2}} - \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{(M-x)\cos\psi}{\sqrt{L^2 + (M-x)^2}} \right] + \right. \\ & \left. + \frac{\epsilon/2}{L^2 + (\epsilon/2)^2} \left[\frac{(2M-x)-a/2}{\sqrt{[(2M-x)-a/2]^2 + (\epsilon/2)^2 + L^2}} - \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{(M-x)+a/2}{\sqrt{[(M-x)-a/2]^2 + (\epsilon/2)^2 + L^2}} \right] + \right. \\ & \left. + \frac{(2M-x)\sin\psi}{L^2 + [(2M-x)\sin\psi]^2} \left[\frac{\epsilon/2\sin\psi - (2M-x)\cos\psi}{\sqrt{(\epsilon/2\sin\psi)^2 + (2M-x)\epsilon/\operatorname{tg}\psi + L^2 + (2M-x)^2}} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{(2M-x)\cos\psi}{\sqrt{L^2 + (2M-x)^2}} \right]\right\}. \end{aligned} \quad (3.70)$$

$$\begin{aligned} e_{-1(np)} = & 2(-e_{11-0} + e_{12-11} + e_{13-12}) = \\ = & 2k\left\{-\frac{x\sin\psi}{L^2 + (x\sin\psi)^2} \left[\frac{\epsilon/2\sin\psi + x\cos\psi}{\sqrt{(\epsilon/2\sin\psi)^2 + x\epsilon/\operatorname{tg}\psi + L^2 + x^2}} - \frac{x\cos\psi}{\sqrt{L^2 + x^2}} \right] + \right. \\ & \left. + \frac{\epsilon/2}{L^2 + (\epsilon/2)^2} \left[\frac{(M+x)-a/2}{\sqrt{[(M+x)-a/2]^2 + (\epsilon/2)^2 + L^2}} - \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{x+a/2}{\sqrt{(x+a/2)^2 + (\epsilon/2)^2 + L^2}} \right] + \frac{(M+x)\sin\psi}{L^2 + [(M+x)\sin\psi]^2} \times \right. \\ & \left. \times \left[\frac{\epsilon/2\sin\psi - (M+x)\cos\psi}{\sqrt{(\epsilon/2\sin\psi)^2 - (M+x)\epsilon/\operatorname{tg}\psi + L^2 + (M+x)^2}} + \frac{(M+x)\cos\psi}{\sqrt{L^2 + (M+x)^2}} \right]\right\}. \end{aligned} \quad (3.71)$$

По аналогии с предыдущим, распространим выражение (3.67) с учетом (3.59), (3.70), (3.71) для случая, когда слева и справа от неоднородности с эдс e_0 (рис.3.11) расположено бесконечное количество расширений,

чередующихся сужениями (перекрещиваниями) с шагом M . Тогда выражение для ε_{dc} , наводимой РАП в НПЛ при их взаимно-параллельном расположении, запишется в виде

$$\begin{aligned}
e_{nml} &= e_o + \sum_{i=1}^{i=-\infty} (-1)^{i+1} e_{-i} + \sum_{i=1}^{i=+\infty} (-1)^i e_i = \\
&= 2k \left\{ \frac{x \sin \varphi}{L^2 + (x \sin \varphi)^2} \left[\frac{\varepsilon/2 \sin \varphi - x \cos \varphi}{\sqrt{(\varepsilon/2 \sin \varphi)^2 - x \varepsilon / \operatorname{tg} \varphi + L^2 + x^2}} + \frac{x \cos \varphi}{\sqrt{L^2 + x^2}} \right] + \right. \\
&+ \frac{\varepsilon/2}{L^2 + (\varepsilon/2)^2} \left[\frac{x - a/2}{\sqrt{(x - a/2)^2 + (\varepsilon/2)^2 + L^2}} + \frac{(M - x) - a/2}{\sqrt{[(M - x) - a/2]^2 + (\varepsilon/2)^2 + L^2}} \right] + \\
&+ \frac{(M - x) \sin \psi}{L^2 + [(M - x) \sin \psi]^2} \left[\frac{\varepsilon/2 \sin \psi - (M - x) \cos \psi}{\sqrt{(\varepsilon/2 \sin \psi)^2 - (M - x) \varepsilon / \operatorname{tg} \psi + L^2 + (M - x)^2}} + \right. \\
&+ \left. \frac{(M - x) \cos \psi}{\sqrt{L^2 + (M - x)^2}} \right] + \sum_{i=1}^{i=-\infty} (-1)^{i+1} \left\{ -\frac{[(i-1)M + x] \sin \psi}{L^2 + [(i-1)M + x]^2 \sin^2 \psi} \times \right. \\
&\times \left[\frac{\varepsilon/2 \sin \psi + [(i-1)M + x] \cos \psi}{\sqrt{(\varepsilon/2 \sin \psi)^2 + [(i-1)M + x] \varepsilon / \operatorname{tg} \psi + L^2 + [(i-1)M + x]^2}} - \right. \\
&- \left. \frac{[(i-1)M + x] \cos \psi}{\sqrt{L^2 + [(i-1)M + x]^2}} \right] + \frac{\varepsilon/2}{L^2 + (\varepsilon/2)^2} \left[\frac{(iM + x) - a/2}{\sqrt{[(iM + x) - a/2]^2 + (\varepsilon/2)^2 + L^2}} - \right. \\
&- \left. \frac{(i-1)M + x + a/2}{\sqrt{[(i-1)M + x + a/2]^2 + (\varepsilon/2)^2 + L^2}} \right] + \frac{(iM + x) \sin \psi}{L^2 + [(iM + x) \sin \psi]^2} \times \\
&\times \left[\frac{\varepsilon/2 \sin \psi + (iM + x) \cos \psi}{\sqrt{(\varepsilon/2 \sin \psi)^2 - (iM + x) \varepsilon / \operatorname{tg} \psi + L^2 + (iM + x)^2}} + \right. \\
&+ \left. \frac{(iM + x) \cos \psi}{\sqrt{L^2 + (iM + x)^2}} \right] + \sum_{i=1}^{i=+\infty} (-1)^i \left\{ -\frac{(iM - x) \sin \psi}{L^2 + [(iM - x) \sin \psi]^2} \times \right. \\
&\times \left[\frac{\varepsilon/2 \sin \psi + (iM - x) \cos \psi}{\sqrt{(\varepsilon/2 \sin \psi)^2 + (iM - x) \varepsilon / \operatorname{tg} \psi + L^2 + (iM - x)^2}} \frac{(iM - x) \cos \psi}{\sqrt{L^2 + (iM - x)^2}} \right] + \\
&+ \frac{\varepsilon/2}{L^2 + (\varepsilon/2)^2} \left[\frac{(i+1)M - x - a/2}{\sqrt{[(i+1)M - x - a/2]^2 + (\varepsilon/2)^2 + L^2}} - \right. \\
&- \left. \frac{(iM - x) - a/2}{\sqrt{[(iM - x) + a/2]^2 + (\varepsilon/2)^2 + L^2}} \right] + \frac{[(i+1)M - x] \sin \psi}{L^2 + [(i+1)M - x]^2 \sin^2 \psi} \times \\
&\times \left[\frac{\varepsilon/2 \sin \psi + [(i+1)M - x] \cos \psi}{\sqrt{(\varepsilon/2 \sin \psi)^2 - [(i+1)M - x] \varepsilon / \operatorname{tg} \psi + L^2 + [(i+1)M - x]^2}} + \right. \\
&+ \left. \frac{[(i+1)M - x] \cos \psi}{\sqrt{L^2 + [(i+1)M - x]^2}} \right] \left. \right\}, \tag{3.72}
\end{aligned}$$

где $i=1,2,3,\dots$ – номер неоднородности (расширения) скрещенной НПЛ.

С учетом (3.72) определим наводимую РАП ε_{dc} в скрещенной НПЛ для указанных выше трех случаев, считая также, что длина линии соответствует условию $H_{nml}=n \cdot M$, содержит четное или нечетное количество расширений.

Согласно рис.3.12, характеризующему первый случай ($x=0$), для H_{nml} , содержащей $n_{(2\kappa)}$ или $n_{(2\kappa+1)}$ расширений

$$\begin{aligned}
e_{nml} &= e_o + \sum_{i=1}^{i=H_{nml}} (-1)^i e_i \neq 0 = \\
&= 2k \left\{ \frac{\varepsilon/2}{L^2 + (\varepsilon/2)^2} \left[\frac{a/2}{\sqrt{(-a/2)^2 + (\varepsilon/2)^2 + L^2}} + \frac{M - a/2}{\sqrt{(M - a/2)^2 + (\varepsilon/2)^2 + L^2}} \right] + \right. \\
&+ \frac{M \sin \psi}{L^2 + (M \sin \psi)^2} \left[\frac{\varepsilon/2 \sin \psi - M \cos \psi}{\sqrt{(\varepsilon/2 \sin \psi)^2 - M \varepsilon / \operatorname{tg} \psi + L^2 + M^2}} + \frac{M \cos \psi}{\sqrt{L^2 + M^2}} \right] + \\
&+ \sum_{i=1}^{i=H_{nml}} (-1)^i \left\{ -\frac{(iM) \sin \psi}{L^2 + [(iM) \sin \psi]^2} \left[\frac{\varepsilon/2 \sin \psi + (iM) \cos \psi}{\sqrt{(\varepsilon/2 \sin \psi)^2 + (iM) \varepsilon / \operatorname{tg} \psi + L^2 + (iM)^2}} - \right. \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{[(iM) + a/2]}{\sqrt{[(iM) + (a/2)]^2 + (\epsilon/2)^2 + L^2}} + \frac{[(i+1)M] \sin \psi}{L^2 + [(i+1)M]^2 \sin^2 \psi} \times \\
& \times \left[\frac{\epsilon/2 \sin \psi - [(i+1)M] \cos \psi}{\sqrt{(\epsilon/2 \sin \psi)^2 - [(i+1)M \epsilon / \operatorname{tg} \psi + L^2 + [(i+1)M]^2}} + \right. \\
& \left. + \frac{[(i+1)M] \cos \psi}{\sqrt{L^2 + [(i+1)M]^2}} \right] \}, \quad (3.73)
\end{aligned}$$

где $i=1, 2, 3 \dots n$.

При расположении РАП в конце линии ($x=H_{\text{нпл}}$) имеет место выражение, аналогичное (3.73), с той лишь разницей, что

$$e_{\text{нпл}} = e_n + \sum_{i=1}^{i=H_{\text{нпл}}} (-1)^{(i+1)} e_i \neq 0. \quad (3.74)$$

Согласно рис.3.13, характеризующему второй случай ($x=0,5H_{\text{нпл}}$), для НПЛ, содержащей $n_{(2k+1)}$ расширений

$$e_{\text{нпл}} = e_{\text{icp}} + \sum_{i=1}^{i=(n-0,5)} (-1)^{(i+1)} e_{-i} + \sum_{i=1}^{i=(n-0,5)} (-1)^i e_i = e_{\text{icp}}, \quad (3.75)$$

где

$$\begin{aligned}
e_{\text{icp}} = & 4k \left\{ \frac{0,5M \sin \psi}{L^2 + (0,5M \sin \psi)^2} \left[\frac{\epsilon/2 \sin \psi - 0,5M \cdot \cos \psi}{\sqrt{(\epsilon/2 \sin \psi)^2 - 0,5M \epsilon / \operatorname{tg} \psi + L^2 + (0,5M)^2}} \right] + \right. \\
& \left. + \frac{\epsilon/2}{L^2 + (\epsilon/2)^2} \left[\frac{0,5M - a/2}{(0,5M - a/2)^2 + (\epsilon/2)^2 + L^2} \right] \right\}.
\end{aligned}$$

Согласно рис.3.14, характеризующему третий случай ($x=0,5H_{\text{нпл}}$), для $H_{\text{нпл}}$, содержащей $n_{(2k)}$ расширений

$$e_{\text{нпл}} = \sum_{i=1}^{i=0,5H_{\text{нпл}}} (-1)^{(i+1)} e_{-i} + \sum_{i=1}^{i=0,5H_{\text{нпл}}} (-1)^i e_i = 0. \quad (3.76)$$

В последнем случае равенство нулю наводимой эдс в НПЛ обусловлено равенством встречных направлений составляющих эдс в контурах, симметрично отстоящих от фазового центра линии /69/.

Таким образом, получены основные соотношения, определяющие свойства неоднородной петлевой линии различного конструктивного исполнения (как датчика местоположения движущегося объекта), в характерных точках вдоль нее. Наиболее общие формулы (3.60) и (3.72) позволяют также определить ряд других характеристик НПЛ, например, чувствительность к перемещению (путем дифференцирования по соответствующему параметру) и т.д.

Зависимости (3.65), (3.66), (3.76) показывают, что теоретически нулевая эдс в НПЛ возможна лишь при соблюдении определенных условий. При расположении РАП в начале (конце) линии, согласно выражений (3.62), (3.63), (3.64), (3.73), наводимая эдс имеет тенденцию к некоторому увеличению, так как количество неоднородностей (контуров), приходящихся слева или справа от РАП, уменьшается. Максимальная эдс в НПЛ имеет место в точках, когда координата РАП определяется соотношением $x_{\text{max}} = (q+0,5)M$ (для формулы (3.72), где $q=0, 1, 2, 3 \dots n$). Соответственно, координаты точек минимальной эдс в НПЛ $x_{\text{min}} = (q+0,5)M$, для (3.60); $x_{\text{min}} = qM$, для (3.72).

3.2. Влияние геометрических размеров неоднородностей на точность определения положения сосуда

Наиболее важной характеристикой, связанной с уровнем наводимой эдс в НПЛ, является шаг неоднородностей. Тенденция к повышению точности контроля движущегося объекта приводит к необходимости уменьшения шага M и, как следствие этого, при прочих равных условиях, к уменьшению уровня наводимой эдс в точках максимумов линии (п.3.1). В связи с этим рассмотрим вопрос влияния уменьшения величины шага M неоднородности НПЛ, показанной на рис.3.2, на эдс , наводимой РАП. Согласно выражению (3.16), предел уменьшения шага M наступит в том случае, когда

$$\sin(\arccos \frac{x}{\sqrt{L^2 + x^2}}) \approx \arccos \frac{M-x}{\sqrt{L^2 + (M-x)^2}}, \quad (3.77)$$

что равносильно $\sin \theta \approx \theta$, т.е. в области существенно малых углов. Воспользовавшись известным разложением функции $\sin \theta$ в степенной ряд /5/

$$\sin \theta = \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} - \frac{\theta^7}{7!} + \dots,$$

найдем такие значения θ , при которых погрешность от отбрасывания всех членов ряда, кроме первого, была бы, например, меньше 0,005, т.е. должно выполняться условие

$$\frac{\theta^3}{3!} = \frac{\theta^3}{6} < 0,005; \quad \theta < 0,03, \quad \text{откуда } \theta < \sqrt[3]{0,03}.$$

$$\text{Так как } \sqrt[3]{0,03} \approx 0,3, \quad \text{то } \theta < 0,3 \text{ рад.} \approx 17^\circ. \quad (3.78)$$

Следовательно, для углов, не превышающих 17° , приближенное равенство (3.77) дает величину синуса с двумя верными десятичными значениями. Таким образом, полагая в (3.16) $x=0$ и в соответствии с (3.77) и (3.78) определим минимально-возможный (предельный) шаг НПЛ, соответствующий критическому расстоянию

$$M_{\min} = l \cdot \text{tg } 17^\circ = 0,305 l_{\text{кр}}. \quad (3.79)$$

Выражение (3.79) показывает, что при уменьшении шага необходимо, чтобы РАП отстояла от плоскости НПЛ не далее, чем

$$l < \frac{M_{\min}}{0,305}. \quad (3.80)$$

Условие (3.80) накладывает ограничение на конструктивное исполнение несскрещенной НПЛ и определяет предельный диапазон расстояний взаимного расположения РАП в НПЛ.

При исследовании влияния на уровень наводимой эдс геометрических размеров неоднородности скрещенной НПЛ ограничимся наиболее простым случаем, когда контур неоднородности представляет собой квадрат. Для этого положим в уравнении (3.59) $\varphi=90^\circ$, (при этом $a/2=0$) $\epsilon=M$, тогда

$$\begin{aligned} e_{o(ck)} &= \frac{8k}{\sqrt{4L^2 + \epsilon^2 + M^2}} \left(\frac{M\epsilon}{4L^2 + M^2} + \frac{\epsilon M}{4L^2 + M^2} \right) = \\ &= \frac{16k\epsilon^2}{(4L^2 + \epsilon^2)\sqrt{4L^2 + 2\epsilon^2}} = 16\kappa \frac{S_H}{(4L^2 + S_H)\sqrt{4L^2 + 2S_H}}, \end{aligned} \quad (3.81)$$

где S_H – площадь неоднородности НПЛ.

Очевидно, задача состоит в нахождении максимума функции (3.81) /5/. Положим, что $L=const$, а S_H – аргумент, тогда

$$\begin{aligned} f'(S_H) &= 16\kappa \left(\frac{S_H}{(4L^2 + S_H)\sqrt{4L^2 + 2S_H}} \right)' = \\ &= \frac{16\kappa}{\sqrt{2}} \left[\frac{-S_H + 32L^4 S_H + 64L^6}{\sqrt{S_H^3 + 10L^2 S_H^2 + 32L^4 S_H + 32L^6}} \right]. \end{aligned} \quad (3.82)$$

Приравняв (3.82) нулю, определим корни первой производной. Решение кубического уравнения дает три различных действительных корня, из которых выбираем лишь положительный, равный

$$S_H = 6,47L^2. \quad (3.83)$$

Исследовав (3.82) на экстремум способом сравнения знаков производной, находим, что при условии (3.83) имеет место максимум функции (3.81), выражение для которого запишется в виде

$$e_{\max} = 16\kappa \frac{6,4L^2}{(4L^2 + 6,47L^2)\sqrt{4L^2 + 2,6,47L^2}} = \frac{2,4\kappa}{L_{om}}. \quad (3.84)$$

Таким образом, в соответствии с вышеизложенным

$$L_{om} = 0,393\sqrt{S_H}; \quad (3.85)$$

$$M = \epsilon = 2,543 L_{om}. \quad (3.86)$$

3.3. Расчет и исследование неоднородных линий на ЭВМ

Для исследования количественных и качественных характеристик системы РАП-НПЛ представим полученные выражения (3.64), (3.73) в виде, удобном для расчета, полагая, что НПЛ определенных размеров расположена вдоль положительной оси абсцисс, а ее начало совпадает с центром координат. Тогда для несскрещенной НПЛ:

$$\begin{aligned} e_{\text{нпл}(nc)} &= e_{o(nc)} + \sum_{i=1}^{i=n} (e_{mi} - e_{ni}) = \\ &= \kappa\epsilon \left\{ \sin(\arccos \frac{x}{\sqrt{l^2 + x^2}}) \frac{\sqrt{l^2 + x^2}}{(l^2 + x^2)\sqrt{l^2 + x^2 + (\epsilon/2)^2}} - \right. \\ &\quad \left. - \sin(\arccos \frac{M-x}{\sqrt{l^2 + (M-x)^2}}) \frac{\sqrt{l^2 + (M-x)^2}}{[l^2 + (M-x)^2] + (\epsilon/2)^2} \right\} + \\ &\quad + \sum_{i=1}^{i=n} \left[\sin(\arccos \frac{[(2iM)-x]}{\sqrt{l^2 + (2iM-x)^2}}) \frac{\sqrt{l^2 + [(2iM)-x]^2}}{\sqrt{[l^2 + (2iM-x)] \sqrt{l^2 + (2iM-x)^2 + (\epsilon/2)^2}}} \right] \end{aligned} \quad (3.87)$$

$$-\sin(\arccos \frac{[(2i+1)M-x]}{\sqrt{l^2 + [(2i+1)M-x]^2}}) \times \\ \times \frac{\sqrt{l^2 + [(2i+1)M-x]^2}}{[l^2 + [(2i+1)M-x]^2] \sqrt{l^2 + [(2i+1)M-x]^2 + (\vartheta/2)^2}}] = f(x, k, M, l, \vartheta, i),$$

где $e_{o(нс)} = e_{mo} - e_{no}$,

Для скрещенной НПЛ:

$$e_{нпл(ск)} = e_{o(ск)} + \sum_{i=1}^{i=n} (-1)^i e_i = \\ = 2k \left\{ \frac{x \sin \psi}{L^2 + (x \sin \psi)^2} \left[\frac{\vartheta/2 \sin \psi - x \cos \psi}{\sqrt{(\vartheta/2 \sin \psi)^2 - x \vartheta / \operatorname{tg} \psi + L^2 + x^2}} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{x \cos \psi}{\sqrt{l^2 + x^2}} \right] + \frac{\vartheta/2}{L^2 + (\vartheta/2)^2} \left[\frac{x - a/2}{\sqrt{(x - a/2)^2 + (\vartheta/2)^2 + L^2}} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{(M-x) - a/2}{\sqrt{[(M-x) - a/2]^2 + (\vartheta/2)^2 + L^2}} \right] + \frac{(M-x) \sin \psi}{L^2 + [(M-x) \sin \psi]^2} \times \right. \\ \left. \times \left[\frac{\vartheta/2 \sin \psi - (M-x) \cos \psi}{\sqrt{(\vartheta/2 \sin \psi)^2 - (M-x) \vartheta / \operatorname{tg} \psi + L^2 + (M-x)^2}} + \frac{(M-x) \cos \psi}{\sqrt{L^2 + (M-x)^2}} \right] \right\} + \\ + \sum_{i=1}^{i=n} (-1)^i \left\{ - \frac{(iM-x) \sin \psi}{L^2 + [(iM-x) \sin \psi]^2} \left[\frac{\vartheta/2 \sin \psi + (iM-x) \cos \psi}{\sqrt{(\vartheta/2 \sin \psi)^2 + (iM-x) \vartheta / \operatorname{tg} \psi + L^2 + (iM-x)^2}} - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{(iM-x) \cos \psi}{\sqrt{L^2 + (iM-x)^2}} \right] + \frac{\vartheta/2}{L^2 + (\vartheta/2)^2} \left[\frac{(i+1)M - x - a/2}{\sqrt{[(i+1)M - x - a/2]^2 + (\vartheta/2)^2 + L^2}} - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{(iM-x) + a/2}{\sqrt{[(iM-x) + a/2]^2 + (\vartheta/2)^2 + L^2}} \right] + \frac{[(i+1)M - x] \sin \psi}{L^2 + [(i+1)M - x]^2 \sin^2 \psi} \times \right. \\ \left. \times \left[\frac{\vartheta/2 \sin \psi - [(i+1)M - x] \cos \psi}{\sqrt{(\vartheta/2 \sin \psi)^2 - [(i+1)M - x] \vartheta / \operatorname{tg} \psi + L^2 + [(i+1)M - x]^2}} + \frac{[(i+1)M - x] \cos \psi}{\sqrt{L^2 + [(i+1)M - x]^2}} \right] \right\} = \\ = f(x, k, M, L, \vartheta, a, i).$$

В соответствии с формулами (3.87) и (3.88) составлены программы расчета (на языке Фортран1V для ЕС 1022) следующих функций:

- для нескрещенной НПЛ

$$e_{нпл(нс)} = f(i), \quad (3.89)$$

$$e_{нпл(нс)} = f(M), \quad (3.90)$$

$$e_{o(нс)} = f(l), \quad (3.91)$$

$$e_{o(нс)} = f(\vartheta), \quad (3.92)$$

$$e_{o(нс)} = f(x), \quad (3.93)$$

$$e_{нпл(нс)} = f(x); \quad (3.94)$$

- для скрещенной НПЛ

$$e_{нпл(ск)} = f(i), \quad (3.95)$$

$$e_{o(ск)} = f(M), \quad (3.96)$$

$$e_{o(ск)} = f(L, a), \quad (3.97)$$

$$e_{o(ск)} = f(\vartheta), \quad (3.98)$$

$$e_{o(ск)} = f(x), \quad (3.99)$$

$$e_{нпл(ск)} = f(x). \quad (3.100)$$

Графики функций (3.89)-(3.100) показаны на рис.3.15-3.27.

Анализ расчетов и графических зависимостей позволяет сделать следующие выводы.

Для нескрещенной НПЛ:

с увеличением количества неоднородностей (рис.3.15) уровень ε_{dc} в НПЛ стабилизируется и тем быстрее, чем больше M и l при $v=const$. Изменение ε_{dc} практически заканчивается при $i \geq 3$, для $M \geq 0,1$ м, $l \geq 0,1$ м:

согласно рис.3.16, при изменении шага M от 0,1 м до 0,5 м происходит основное увеличение ε_{dc} в неоднородности НПЛ, сопровождающееся большей интенсивностью при меньших значениях l . При $M \geq 0,5$ м рост ε_{dc} незначителен;

уменьшение расстояния l (рис.3.17) между РАП и неоднородностью НПЛ влечет за собой общий подъем уровня ε_{dc} , значительно увеличивающегося при $l > 0,3$ м, с одновременным увеличением $M=v$. При $l > 0,3$ м для всех значений $M=v < 0,5$ м убывание ε_{dc} тем интенсивнее, чем меньше неоднородности НПЛ. Так, в соответствии с (3.80), критическое удаление РАП (для $M=v=0,1$ м) составляет величину $l_{кр} \approx 0,33$ м;

влияние изменений размера v (рис.3.18) на уровень ε_{dc} сводится к тому, что для всех $v > 0,5$ м и $l > 0,1$ м заметного роста ε_{dc} не происходит. Слияние характеристик при $v > 0,1$ м, для $M > 0,3$ м указывает на слабую зависимость ε_{dc} при их увеличении;

с изменением x (рис.3.19) в пределах шага M полярность ε_{dc} в неоднородности меняется на противоположную при $0,5$ м $< x < 0,5$ м. В точке $x=0,5$ м ε_{dc} равна нулю. При $M=const$ крутизна ε_{dc} увеличивается с уменьшением l и, наоборот, при $l=const$ смещение максимумов ε_{dc} тем больше, чем меньше шаг M . Вне интервала шага неоднородности с увеличением перемещения x ε_{dc} уменьшается и тем быстрее, чем меньше M при одинаковых l $e_{o(нпл)}=f(x)$, по существу является функцией отклика или реакцией неоднородности НПЛ на перемещение РАП. Производная по перемещению при $x=0,5$ м дает значение чувствительности (крутизны) ε_{dc} . По графику чувствительность определяется отношением приращения наводимой ε_{dc} в НПЛ к приращению перемещения на интервале половины шага. При приближенных расчетах чувствительность НПЛ можно оценить по формуле:

$$\xi = \frac{e_{\max}(x)}{0,5M} \text{ мВ/мм.} \quad (3.101)$$

Графики рассматриваемой функции характерны и для НПЛ, шаг сужений которой превышает шаг расширений (при $M=0,1$ м, более чем в 5 раз), а также для НПЛ с равномерным чередованием сужений и расширений с $M \geq 0,5$ м.

Графики функции (рис.3.20) являются типичными для НПЛ с шагом $M \leq 0,5$ м и количеством неоднородностей (расширений) $i \geq 10$. Появление первого максимума (наибольшего из всех последующих по уровню) ε_{dc} при перемещении РАП к началу НПЛ ($-0,5$ м $\leq x \leq 0$) обуславливается отсутствием «компенсирующих» неоднородностей в области $x \leq 0$. По мере дальнейшего перемещения ($x > 0$) уровень максимумов ε_{dc} , приходящихся на концы интервала шага M , снижается и при $x \geq 0,5$ м стабилизируется. Минимумам ε_{dc} в НПЛ соответствуют точки с координатами $x_{\min(нц)}=(q+0,5)M$, где q – номер неоднородности (расширения), включая и нулевую. Максимумы ε_{dc} приходятся на точки с координатами $x_{\max(нц)}=qM$. Большому значению уровня первого максимума так же, как и последующих, соответствует меньшая величина расстояния l . По мере уменьшения $l_{кр}$ для данных M (формула (3.80)) НПЛ теряет свои функции датчика местоположения (штрихпунктирная кривая).

При прочих равных условиях чувствительность НПЛ, состоящей из n неоднородностей, ниже, чем у НПЛ с одной неоднородностью.

Для скрещенной НПЛ:

с увеличением количества неоднородностей (рис.3.21), уровень ε_{dc} в НПЛ с колебаниями стабилизируется, и тем быстрее, чем больше M и L при $v=const$. Колебания ε_{dc} несут существенны при $i \geq 6$, для $M \geq 0,1$ м, $a \geq 0$, $L \geq 0,1$ м;

согласно рис.3.22, при изменении шага в пределах $0,1$ м $\leq M \leq 0,5$ м происходит основное увеличение ε_{dc} в неоднородности НПЛ, сопровождающееся большей интенсивностью при меньших значениях a и L . При определенных размерах шага M и расстояния L как для $a=0$ (в соответствии с формулой (3.86)), так и для $a=M/4$ имеет место максимум ε_{dc} . При $M > 0,8$ м изменение ε_{dc} незначительно;

согласно рис.3.23 и 3.24, близкое расположение кривых ε_{dc} для всех $L > 0,4$ м и $L \leq 0,2$ м, при $M=0,2$ м указывает на слабую зависимость функции при увеличении шага неоднородности для $a \geq 0$. $v=const$. Уменьшение ε_{dc} с увеличением L наиболее существенно при $M \leq 0,2$ м и $a > 0$;

характер влияния размера v (рис.3.25) на уровень ε_{dc} аналогичен влиянию шага M , поскольку эти параметры неоднородности НПЛ по отношению к РАП находятся в одинаковых условиях при $x=0,5$ м. При определенных M и L с изменением v возможны случаи пересечения кривых ε_{dc} при различных a (сплошная и штриховая линии) при $M=0,2$ м и $L=0,1$ м, что указывает на приемлемость различного конструктивного исполнения НПЛ. Однако характеристики НПЛ с $a=0$ при оптимизации ширины выше, чем при $a > 0$ для $M=const$, т.к. в любом случае увеличение этого параметра уменьшает площадь неоднородности. Согласно графику, для $M=0,2$ м, $a=0$, $L=0,1$ м, $L=0,2$ м, $v_{\text{опт}} \approx 1,33L$; для $M=0,1$, $a=0$, $L=0,1$ м, $L=0,2$ м, $v_{\text{опт}} = 1,4L$;

функция отклика (рис.3.26) имеет максимум ε_{dc} при $x=0,5$ м, уровень которого в значительной степени зависит от L и в меньшей степени от изменений v . При изменении x от $-0,5$ м до 0 и от 0 до $+0,5$ м ε_{dc} меняет свою полярность на противоположную, что является следствием встречной направленности ε_{dc} в вертикальных сторонах неоднородности. Убывание ε_{dc} по мере увеличения x происходит интенсивнее при меньших значени-

ях L и a . Чувствительность к перемещению при фиксированных L , ϵ , a выше у неоднородности с меньшим шагом.

Реакция неоднородности на перемещение РАП аналогична нескрещенной НПЛ; графики функции (рис.3.27) являются типичными для НПЛ с шагом $M \leq 0,5$ м. Первый максимум в НПЛ с более высоким уровнем при изменении x из области отрицательных значений к нулю обусловлен отсутствием неоднородностей в области $x \leq 0$, чем также объясняется и его некоторое смещение по координате относительно центра симметрии нулевой неоднородности.

По мере дальнейшего увеличения ($x > 0$) уровень максимумов $\epsilon_{дс}$, приходящихся на середину шага M , уменьшается и при $x \geq 0,8$ м становится неизменным. Минимумам $\epsilon_{дс}$ в НПЛ соответствуют точки с координатами $x_{min(ck)} = (q+0,5)M$.

Чувствительность НПЛ, состоящей из n неоднородностей, выше, чем у нескрещенной НПЛ, в связи с перекрещиванием проводников вдоль длины, способствующих опрокидыванию фазы $\epsilon_{дс}$. При $M=0,1$ м, $a=0$, $\epsilon=0,1$ м для расстояний $L \geq 0,4$ м работа НПЛ в качестве датчика становится неэффективной.

Сравнительный анализ основных характеристик нескрещенной и скрещенной НПЛ, приведенный в табл.3.1, показывает, что при одинаковых параметрах скрещенная НПЛ более чем в два раза эффективнее нескрещенной НПЛ по чувствительности и по уровню наводимой в ней $\epsilon_{дс}$.

Таблица 3.1.

Результаты расчета основных характеристик нескрещенной и скрещенной НПЛ

Ф у н к ц и и	П а р а м е т р ы			
	$K=1$ мВ·м, $\epsilon=0,1$ м, $x_{(НС)}=M$, $x_{(СК)}=0,5 M$, $a=0$, $i=10$			
	$M=0,1$ м; $L=0,1$ м	$M=0,2$ м; $L=0,1$ м	$M=0,1$ м; $L=0,2$ м	$M=0,2$ м; $L=0,2$ м
$e_{\sigma(НС)}(x)$, мВ	5,95	8,05	0,98	1,85
$e_{НПЛ(НС)}(x)$, мВ	3,52	7,25	0,15	1,0
$\xi_{(НС)}$, мВ/мм	0,07	0,073	0,002	0,01
$e_{\sigma(СК)}(x)$, мВ	13,06	17,78	2,21	3,95
$e_{НПЛ(СК)}(x)$, мВ	7,96	15,08	0,21	2,48
$\xi_{(СК)}$, мВ/мм	0,16	0,15	0,0042	0,024
$e_{\sigma(СК)}/e_{\sigma(НС)}$	2,2	2,2	2,25	2,16
$e_{НПЛ(СК)}/e_{НПЛ(НС)}$	2,26	2,08	2,0	2,48
$\xi_{(СК)}/\xi_{(НС)}$	2,28	2,05	2,1	2,4

В ы в о д ы

1. Получены основные аналитические выражения (3.16) и (3.58) для расчета $\epsilon_{дс}$, наводимой в неоднородности петлевой линии рамочной антенной передатчика, при взаимно-перпендикулярном и взаимно-параллельном расположении их плоскостей.

Показано, что при перемещении РАП вдоль неоднородности НПЛ уровень $\epsilon_{дс}$ изменяется в зависимости от местоположения РАП и имеет экстремумы в точках с координатами $x_{max}=M$ (максимумы), $x_{min}=0,5 M$ (минимумы) по формуле (3.16) и соответственно $x_{max}=0,5 M$, $0,5M < x_{min} < 0,5 M$ по формуле (3.59).

2. Получены аналитические зависимости для определения наводимой $\epsilon_{дс}$ в НПЛ для трех характерных случаев местоположения РАП относительно неоднородностей и линии, формулы (3.64), (3.65), (3.66) и (3.73), (3.75), (3.76). Анализ указанных выражений позволил установить наиболее общие формулы (3.60) и (3.72) для расчета наводимой $\epsilon_{дс}$ при различных конструктивных параметрах РАП и НПЛ. Согласно (3.60), максимальная и минимальная $\epsilon_{дс}$ в НПЛ имеет место в точках, когда координата РАП определяется соотношением $x_{max}=q \cdot M$ и $x_{min}=(q+0,5) M$, а по формуле (3.72) – координаты $x_{max}=(q+0,5)M$ и $x_{min}=0,5 M$.

3. На основании анализа выражения (3.16) определен минимальный (предельный) шаг НПЛ в зависимости от расстояния между РАП и плоскостью неоднородности НПЛ, формула (3.80).

Получены аналитические зависимости для расчета оптимального удаления РАП от плоскости неоднородности при требуемых размерах шага и ширины НПЛ, формулы (3.85), (3.86) и обеспечения максимального уровня наводимой $\epsilon_{дс}$, формула (3.84).

4. Расчетами, выполненными на ЭВМ, доказано, что при одинаковых параметрах скрещенная НПЛ более чем в два раза эффективнее нескрещенной по чувствительности и максимальному уровню наводимой РАП $\epsilon_{дс}$.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СРЕДСТВ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ПОДЪЕМНЫХ СОСУДОВ

В основу схемных решений индуктивной аппаратуры положены некоторые принципы и конструктивные решения средств общепромышленной индуктивной связи /30,104,105/, которые послужили базой при создании различных экспериментальных образцов средств защиты /49/. Подробный анализ схемных решений указанных средств, с точки зрения требований, предъявляемых к ним, специфики расчета, помехоустойчивости, целей и задач, а также с учетом опыта других разработок /12,49, 87,103/, изложен в соответствующих разделах НИР 1976-1982 г. (инв. № Б 618836Б, Б 988366, Б 855416, Б 920308, Б 696916, 0282003022710, 02820082564, 028330026877, 02830023672, 02830022184, 02830026676, 02840008901, 02840029257), а также полностью посвященных проблеме с 1983 г. (инв. № 02850026744, 02860033337, 02870020873 и др.), выполненных во Фрунзенском политехническом институте (ФПИ) непосредственно автором. Изготовление опытных образцов многофункциональной индуктивной аппаратуры КОНТУР /82/, а также (в соответствии с техническим заданием /81/) отдельных узлов и блоков унифицированной системы СТАРТ /71,80/ выполнено в экспериментальном конструкторском бюро при ФПИ.

4.1. Структура системы

Разработанные средства определения местоположения подъемных сосудов вошли в состав системы СТАРТ /80/, структурно-функциональная схема которой показана на рис.4.1. В соответствии с рис.4.1 и принятыми условными сокращениями (прилож.5), все блоки и узлы общей системы, расположенные на подъемном сосуде (в стволе) входят в комплект аппаратуры стволовой (КАС) и по аналогии, элементы, расположенные в машинном зале (на поверхности), входят в комплект аппаратуры поверхностной (КАП). Информационные сигналы от датчиков ДК, ДД, ДП, ДВ, ДС или от ПУС поступают на вход БФК, где происходит формирование цифровых кодов команд, воздействующих на ПЕРУ БКС. Излучающий элемент БКС ПР (или ТС) наводит *эдс* индукции в линиях ОПЛ, НПЛ1, НПЛ2 (или головном канате), которая через фидеры поступает на входы ПРИУ БКС КАП. После усиления, детектирования соответствующими элементами БКС информационные сигналы поступают на БОИ 1 для обработки и отображения, при этом сигналы управления, в свою очередь, по обратной связи воздействуют на БФК и ПЕРУ 1 БКС. Далее, по линии связи ОПЛ (или при помощи ТП по головному канату) наведенная *эдс* поступает на БКС КАС и затем на БФК и БОИ 1, обеспечивая квитирование сигнала управления из сосуда (клетки). Параллельно с вышеуказанными сигналами, информационные сигналы о местоположении подъемного сосуда, сформированные при помощи ПР БКС КАС и ДМ, поступают через фидеры на входы ПРИУ БКС КАП (где происходит их усиление и детектирование) и далее, на блок обработки и отображения информации о параметрах движения подъемных сосудов БОИ 2. Блок БОИ 2 производит также обработку и отображение косвенной информации о местоположении и скорости сосудов от датчика ДБ. Питание КАС осуществляется через БПС от БАК. КАП получает питание от БПП сети 380 В 50 Гц или от БАК. На рис.П.6.1-П.6.4 показаны структурные схемы индуктивного устройства непрерывного определения положения сосудов (прилож.6), способного функционировать без источника питания, устанавливаемого на движущемся объекте. Указанное устройство испытано в условиях клетового ствола ш.Восточная Хайдарканского ртутного комбината и дало положительный эффект. На рис.П.6.5 приведена структура одной из разновидностей индуктивной системы, работающей также в автономном режиме без источника питания на сосудах /76/.

4.2. Схемы и конструктивные решения

Преобразователь угловых перемещений (ДБ-001). На рис.4.2 представлена схема конструктивного решения преобразователя угловых перемещений, отвечающего приведенным выше требованиям и расчету (разд.2) /80/.

Преобразователь линейных перемещений (ДМ-001). На рис.4.3 показана принципиальная схема и конструктивное решение преобразователя линейных перемещений, отвечающего основным требованиям (разд.2), требованиям Правил безопасности /34/ и расчету (разд.3) /80/.

Схемные решения индуктивных устройств и устройств обработки, индикации и защиты. На рис.4.4 приведена схема приемно-передающего блока БКС с подключаемыми к нему элементами (в соответствии со структурно-функциональной схемой рис.4.1), при этом, для работы БКС в режиме определения параметров движения сосудов используются только ПЕРУ 1 и ПРИУ 3.2, ПРИУ 3.3 /80/.

На рис.П.6.6-П.6.15 приведены принципиальные схемы соответственно:

- передающего устройства;
- приемного устройства;

- преобразователя угловых перемещений;
- формирователя путей импульсов преобразователя линейных перемещений;
- отображения информации о параметрах движения и времени;
- устройства защиты от переподъема (превышения скорости).

На рис.П.6.16 и П.6.17 представлены временные диаграммы работы формирователя импульсов угловых (линейных) перемещений и формирователя управляющих импульсов. В соответствии со структурной схемой рис.4.1 (рис.4.4), канал преобразователя линейных перемещений, кроме принципиальных схем собственно ОНПЛ, ПЕРУ, ПРИУ, ФПИ (рис.4.3, П.6.6-П.6.8, П.6.10), включает также принципиальные схемы рис.П.6.11-П.6.14, являющиеся идентичными каналу преобразователя угловых перемещений, с учетом рис.П.6.9.

Расчетные параметры контуров ПЕРУ и ПРИУ сведены в табл.П.6.1 и П.6.2. Схема защиты от переподъема (рис.П.6.15) использует сигналы от преобразователей угловых и линейных перемещений (канал *M*). Аналогично осуществляется защита от превышения скорости (канал *V*). Установка необходимого ограничения по переподъему и превышению скорости для любой подъемной установки (в соответствии с /34/) осуществляется набором двоичного кода в каждом разряде при помощи тумблеров *SB1...SB4* интегральной микросхемы *DD1* (рис.П.6.15). После срабатывания средств защиты на цифровом дисплее индицируется величина переподъема (превышения скорости) и при необходимости документируется путем вывода информации на ЦПУ или для дальнейшей обработки в микроЭВМ /71,82,80/. Техническое описание и работа блоков и узлов средств системы подробно изложена в /23,80,82,87/.

4.3. Стендовые испытания

Для получения экспериментальных характеристик НПЛ, а также для отработки схемных решений блоков и узлов средств системы и проведения измерений совместной работы средств системы, разработан лабораторный стенд, общий вид которого показан на рис.4.5.

Установка представляет собой горизонтально расположенную конструкцию с размерами 3,0×1,0×1,5 м и содержит электропривод, приводной барабан, пульт управления, блок питания, передающее устройство, закрепленное на тележке, которая установлена на рельсовом пути; с валом тягового барабана жестко связан датчик угловых перемещений; на некотором расстоянии от передающего устройства расположена петлевая неоднородная линия, укрепленная на монтажном устройстве. Монтажное устройство позволяет формировать НПЛ с необходимыми параметрами и может устанавливаться относительно передающего устройства в горизонтальной и вертикальной плоскостях по направляющим в диапазоне 0...0,5 м с точностью в 1 мм. Тележка приводится в движение посредством тягового тросика, навитого на приводной барабан и перекинутого через вращающийся блок на другом конце рельсового пути. Площадка тележки, с жестко закрепленным на ней передающим устройством, может поворачиваться вокруг своей оси на 360° и снабжена шкалой с угловыми делениями через 1°. Сбоку рельсового пути закреплена измерительная линейка с ценой деления в 1 мм, позволяющая определять (при помощи визира на тележке) местоположение передающего устройства вдоль неоднородностей НПЛ.

Принципиальная схема управления электроприводом лабораторной установки приведена на рис.4.6. Включение (и реверсирование) электродвигателя осуществляется контактами *K 1.2*, *K 1.3* или *K 2.2*, *K 2.3* при срабатывании соответствующих реле *K1* или *K2*. Одна из двух скоростей вращения электродвигателя задается тумблером *S11* и имеется возможность выбора одной из 32 фиксированных скоростей перемещения тележки в диапазоне 0,0001...1 м/с.

Схемой управления предусмотрены два режима работы установки: ручной и автоматический.

При ручном управлении тумблер режима работы *S12* устанавливается в положение "руч.", а тумблер рода работы *S4* – в положение "ост".

После выбора необходимой скорости и замыкания соответствующей цепи тумблером (с тремя фиксированными положениями) направления движения *S10* (вперед – "ВП" или назад "НЗ") включается реле *K1* или *K2* и происходит перемещение тележки в нужном направлении. У упоров в крайних положениях на рельсовом пути тележка воздействует своим колесом на микропереключатель *S2* и *S3*, что вызывает ее останов. Возврат тележки из крайнего положения осуществляется тумблером *S10*. Функции *S10* продублированы кнопками *S5* и *S6*, для оперативного управления перемещением тележки в необходимую сторону. При установке тумблера *S4* в положение реверс ("рев.") тележка, дойдя до одного из крайних положений, будет перемещаться с возвратом вблизи упора. При автоматическом управлении тумблер *S12* устанавливается в положение "Авт."

После замыкания контактов кнопки *S9* – "Пуск" реле *K1* включается и блокируется контактами *K1.1* цепь кнопки *S9*. При движении тележки вперед по винтовому валу приводного барабана в направляющих перемещается ползун, который, дойдя до укрепленного на направляющих микропереключателя *S7*, воздействует на него, что вызывает отключение реле *K1* и включение *K2*. Вследствие этого осуществляется реверс электродвигателя, а тележка и ползун меняют свое направление перемещения. При воздействии ползуна на микровыключатель *S8* (также закрепленного на направляющих) отключается *K2*, включается *K1* и происходит следующий цикл движения (сканирования) тележки на необходимом участке рельсового пути.

Таким образом, обеспечиваются все необходимые при исследовании режимы работы установки, а также взаимное расположение РАП и НПЛ.

Методика измерения характеристик НПЛ на лабораторной установке сводилась к следующему:

- на монтажном устройстве формируются неоднородности несскрещенной (скрещенной) НПЛ с необходимыми конструктивными параметрами $M, a, v, H_{нпл}$;
- передающее устройство (с известным параметром K) закрепляется на площадке тележки и ориентируется относительно НПЛ так, чтобы обеспечивалось их взаимно-перпендикулярное (взаимно-параллельное) расположение;
- производится калибровка прибора ИУУ-300 при помощи придаваемого к нему генератора;
- монтажное устройство с НПЛ размещается на необходимом расстоянии $L(l)$ от РАП;
- к выходу НПЛ через согласующий элемент подключается ИУУ-300 и в режиме узкой полосы настраивается в резонанс с несущей частотой передающего устройства;
- передающее устройство перемещается (на малой скорости) вдоль неоднородности НПЛ в пределах шага (или всей длины линии) и через равные промежутки интервала пути (с остановкой тележки) снимаются показания прибора ИУУ-300 в неперах. В случаях непрерывного перемещения передающего устройства вдоль НПЛ применяется осциллографирование;
- производится пересчет значений неперов в милливольты (по формуле $U_{(MB)}=775 \exp /N_p/ /82/$) и выполняется обработка результатов измерений стандартным методом при помощи специализированной микроЭВМ типа МК-64, способной работать с объектом в автоматическом режиме.

Определение параметра K рамочной антенны передающего устройства сводится к измерению действующего значения колебательного тока I в контуре РАП прибором Т-15 (либо при помощи метода генератора стандартного поля /3/) и последующему расчету, в соответствии с формулой (3.1). По выполненным измерениям колебательного тока, с учетом конструктивных параметров рамочных антенн (табл.П.4.1) передающих устройств, для несущих частот 132,8 и 148,4 кГц, $-I \approx 53$ мА, при этом $K_{(132,8)} \approx K_{(148,4)} \approx 6,4$ мВ·м.

Данные результатов обработки измерений основных характеристик несскрещенной и скрещенной НПЛ приведены в табл.4.1, 4.2.

В указанных таблицах каждое из экспериментальных значений наводимых ε_{dc} получено в результате четырехкратного повторения каждого из 11 опытов с последующим усреднением. Дисперсия и стандартная ошибка вычислялись по известным формулам /5/:

$$S^2 = \sum_1^K (e_p - \bar{e}_p)^2 / K - 1, \quad S = \sqrt{S^2},$$

где K – число повторений данного опыта; $(e_p - \bar{e}_p)^2$ – квадрат отклонения расчетных и средних экспериментальных данных ε_{dc} .

Расхождение расчета и эксперимента в процентах оценивалось по выражению $S\% = S \cdot 100\%$ ($e_{max} - e_{min}$), где e_{max} , e_{min} – максимальное и минимальное значения наводимых ε_{dc} при измерении.

При оценке погрешности методики эксперимента предполагалось, что все погрешности аддитивные, т.е.

$$\delta\% = \sum \delta_{u.n.} + \sum \delta_{л.у.} + \sum \delta_{сх.},$$

где $\sum \delta_{u.n.} = 3\%$ – суммарная погрешность измерительных приборов (ИУУ-300, Т-15, Ц4312); $\sum \delta_{л.у.} \approx (3...5)\%$ – суммарная погрешность лабораторной установки (измерительной линейки, взаимной ориентации передающего устройства и петлевой неоднородной линии); $\sum \delta_{сх.} = (5...7)\%$ – суммарная схемная погрешность (передающего устройства с рамочной антенной, петлевой неоднородной линии, согласующего устройства и т.д.).

С учетом изложенного, ориентировочное значение погрешности методики эксперимента находится в пределах $\delta\% = (10...15)\%$.

Поскольку (согласно табл.4.1 и 4.2) полученные значения $S\% < \delta\%$, следовательно, аналитические зависимости (3.87), (3.88) соответствуют экспериментальным данным в пределах допустимой погрешности при инженерных расчетах и удовлетворительной погрешности методики эксперимента.

Таблица 4.1

**Результаты обработки экспериментальных данных измерения основной характеристики
нескращенной НПЛ $e_{нпл(ис)} = f(x)$**

Расчетные и эксперимент. характеристики, мВ	П а р а м е т р ы												Дис- персия S^2	Стандарт- ная ошибка S	Расхождение расчета и экспе- римента $S\%$	
	$\kappa=6,4$ мВ·м; $\sigma=0,1$ м; $n=20$; $H_{нпл}=2$ м; $q=10$															
	x, м											$M, м$				$l, м$
1,0	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08	1,09	1,1						
/ e_p /	22,52	17,92	13,44	8,96	4,48	0	4,48	8,96	13,44	17,92	22,52					
e_s	21,0	17,0	13,1	8,3	4,0	0,1	4,1	8,4	13,0	17,0	21,0	0,1	0,1	2,6	1,61	7,7
/ e_p /	0,70	0,51	0,38	0,27	0,13	0	0,13	0,27	0,38	0,51	0,70			0,36		
e_s	0,69	0,48	0,37	0,25	0,12	0,02	0,12	0,25	0,36	0,47	0,68	0,1	0,2	10^{-3}	0,035	5,5

Продолжение табл.4.1

Расчетные и эксперименталь- ные характери- стики, мВ	П а р а м е т р ы												Дис- персия S^2	Стандарт- ная ошибка S	Расхождение расчета и экспе- римента $S\%$	
	$\kappa=6,4$ мВ·м; $\sigma=0,1$ м; $n=10$; $H_{нпл}=2$ м; $q=5$															
	x, м											$M, м$				$l, м$
1,0	1,02	1,04	1,06	1,08	1,1	1,12	1,14	1,16	1,18	1,2						
/ e_p /	46,4	37,37	28,03	18,68	9,34	0	9,34	18,68	28,03	37,37	46,4					
e_s	44,6	35,9	27,0	18,0	8,4	0,1	8,5	17,7	27,0	36,1	44,5	0,2	0,1	5,9	2,43	5,4
/ e_p /	6,4	5,12	6,84	2,56	1,28	0	1,28	2,56	3,84	5,12	6,4					
e_s	5,9	4,9	3,7	2,4	1,18	0,08	1,2	2,4	3,65	5,0	6,0	0,2	0,2	0,197	0,44	5,0

Таблица 4.2

**Результаты обработки экспериментальных данных измерения основной характеристики
нескращенной НПЛ энпл(нс) = f(x)**

Расчетные и экспериментальные характеристики, мВ	Параметры												Дисперсия S^2	Стандартная ошибка S	Расхождение расчета и эксперимента $S\%$	
	$\kappa=6,4$ мВ·м; $\epsilon=0,1$ м; $n=20$; $H_{\text{нпл}}=2$ м; $q=10$; $a=0$															
	x, м											M, м				l, м
1,0	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08	1,09	1,1						
/e _п /	50,94	40,96	30,72	20,5	10,24	0	10,24	20,5	30,72	40,96	50,94					
e _э	48,0	38,6	29,0	18,8	9,0	0,1	9,0	18,9	29,0	38,7	48,0	0,1	0,1	14,1	3,75	7,8
/e _п /	1,34	1,07	0,81	0,5	0,26	0	0,26	0,5	0,81	1,07	1,34			0,87		
e _э	1,3	0,98	0,77	0,5	0,25	0,05	0,24	0,5	0,78	1,0	1,3	0,1	0,2	10 ⁻²	0,093	7,2

Продолжение табл.4.2

Расчетные и экспериментальные характеристики, мВ	Параметры												Дисперсия S^2	Стандартная ошибка S	Расхождение расчета и эксперимента $S\%$	
	$\kappa=6,4$ мВ·м; $\epsilon=0,1$ м; $n=10$; $H_{\text{нпл}}=2$ м; $q=5$; $a=0$															
	x, м											M, м				l, м
1,0	1,02	1,04	1,06	1,08	1,1	1,12	1,14	1,16	1,18	1,2						
/e _п /	96,38	76,8	57,5	38,4	19,2	0	19,2	38,4	57,5	76,8	96,38					
e _э	91,5	73,2	55,0	36,0	17,9	0,15	18,0	36,1	55,0	73,2	91,7	0,2	0,1	32,83	5,73	6,3
/e _п /	15,87	12,29	9,21	6,1	3,1	0	3,1	6,1	9,21	12,29	15,87					
e _э	15,1	11,85	8,8	5,8	2,8	0,1	2,8	5,8	8,8	11,8	15,1	0,2	0,2	0,8	0,89	5,9

4.4. Аппаратурная реализация и исследование быстродействия

Опытные образцы разработанных средств системы показаны на рис.4.7-4.13. Первые испытания индуктивной аппаратуры КОНТУР с датчиками контроля безопасности были проведены в стволе ш. Новая Хайдарканского ртутного комбината в 1983 г., которые послужили основой для разработки программы и методики приемочных испытаний /82/, в соответствии с которой выполнены исследования средств системы СТАРТ /80/.

Осциллографирование исследуемых параметров средств системы на ш.Новая ХРК производилось шлейфовым осциллографом НО 41У4.2 (И 105) по схеме, приведенной на рис.4.14.

На осциллограммах (рис.4.15, 4.16) анализировались следующие характеристики:

- сигнал постоянного тока от ДКБ (рис.П.6.5);
- сигнал 50 Гц от обмотки электромагнита предохранительного тормоза подъемной машины;
- максимальная паспортная скорость подъемной машины 5,65 м/с;
- расчетная величина уровня сигнала от ОПЛ;
- скорость подъемной машины;
- сигнал 50 Гц от цепи контактов реле $K1$;
- сигнал постоянного тока от контактов реле $K2$;
- сигнал постоянного тока от герконового датчика касания клетки (противовеса) кулаков (перекрытий);
- нулевая скорость подъемной машины.

Отсутствие ложных срабатываний аппаратуры проверялось в режимах разгона и движения на максимальной скорости (рис.4.15а,б), а также при замедлении и динамическом торможении (рис.4.16в,г). Уровень сигнала с выхода ОПЛ находился в пределах расчетного, а его колебания обусловлены главным образом изменяющимся в процессе движения сосуда расстоянием между РАП и ОПЛ. Уменьшения сигнала от ОПЛ в крайних точках ствола не наблюдалось, а его затухание по высоте ствола не превышало 0,005 ДБ/км для линии из кабеля типа ШАКС 1×4.

Осциллограммы проверки режимов работы аппаратуры на горизонте "0" и горизонте 420 м показаны на рис.4.17а,б. Аварийный режим и режим технологического напуска имитировались путем жесткой посадки клетки на кулаки с последующим ослаблением натяжения каната. Как следует из осциллограммы, в первом случае происходит автоматическое отключение электромагнита предохранительного тормоза контактами исполнительного реле $K2$ после срабатывания ДКБ, а во втором случае отключение не происходит, поскольку реле $K2$ блокируется в блоке индикации (прилож.7).

Типичные осциллограммы (рис.4.18) характеризуют время срабатывания элементов аппаратуры в режиме контроля напуска каната. Анализ быстродействия индуктивных средств, рассматриваемого с момента разрыва цепи модуляции передающего устройства герконом ДКНК до момента срабатывания реле $K2$, показывает, что основное время задержки 0,03 с обусловлено исполнительным реле типа МКУ-48 как более инерционным элементом. Время задержки, равное 0,014 с, распределено между промежуточным реле типа РЭС-10 и собственно схемой индуктивного канала /82/ (прилож.7).

Поскольку время отпускания конкретного реле было известно (по измерениям в лабораторных условиях прибором Ф250 с погрешностью не более 10%) $0,012 \leq T_{от} \leq 0,013$ с, то время задержки индуктивного канала $T_{ин} = (0,001...0,002)$ с. Следует отметить, что время отпускания реле типа МКУ-48 при питании его переменным напряжением характеризуется значительным разбросом /82/. По данным проведенного осциллографирования $T_{омку} = (0,02...0,055)$ с. Таким образом, время срабатывания индуктивной аппаратуры с используемыми типами реле лежит в пределах $T_{ин} = (0,034...0,069)$ с.

Время задержки отключения электромагнита предохранительного тормоза (согласно рис.4.17а; 4.18) составляет $T_{оэмт} = (0,05...0,058)$ с. Запись сигнала с выхода скрещенной НПЛ производилась в соответствии со схемой рис.4.14 (позиция 3).

Работа скрещенной НПЛ в качестве датчика местоположения подъемного сосуда (скипа) при различных режимах движения показана на рис.4.19-4.23. На рис.4.23 приведена осциллограмма совместной работы скрещенной НПЛ и ОПЛ.

На указанных осциллограммах калибровочному шлейфу 30 мВ соответствуют расчетные уровни сигналов для шага НПЛ, равного 0,1, 0,2 м, а шлейфу 70 мВ (рис.4.23) соответствует максимальный уровень; максимальное значение скорости подъемной установки равно $V=3.75$ м/с.

Анализ представленных характерных осциллограмм показывает следующее:

- максимальный уровень сигнала НПЛ находится в пределах 30 мВ, что соответствует расчетным значениям. Несколько меньший уровень сигнала, наводимого в НПЛ, обусловлен экранированием РАП металлическим кожухом, потерями излучающей энергии в металлических конструкциях копра, потерями в НПЛ и фидере;
- отмеченные максимальные и минимальные изменения уровня сигнала НПЛ (рис.4.24) соответствуют поперечным колебаниям сосуда в пределах ± 40 мм;
- согласно осциллограммам (рис.4.19-4.24), минимумы сигнала соответствуют фазовым центрам, а максимумы приходятся на расширения неоднородностей линии;
- минимумы сигнала не зависят от изменения расстояния между РАП и НПЛ при различных скоростях движения подъемного сосуда;

- изменение скорости движения подъемного сосуда ведет к пропорциональному изменению частоты повторения напряжения сигнала НПЛ без запаздывания;
- наиболее точная информация о перемещении подъемного сосуда приходится на минимумы сигнала НПЛ, соответствующие шагу неоднородностей;
- уровень наводимого сигнала в НПЛ не зависит от скорости движения подъемного сосуда;
- взаимного влияния НПЛ1, НПЛ2 и ОПЛ не наблюдалось;
- при шаге $M=0,1$ м ($M=0,2$ м) преобразователя линейных перемещений и при работе в режиме учетверения путевых импульсов точность определения местоположения сосудов составила 0,025 м (0,05 м) и не зависела от глубины ствола;
- по измерениям, время срабатывания средств защиты от переподъема (превышения скорости) /80.82/ с выходным реле типа РЭС 64 Б (реле $K1$ см.рис.П.6.15), находилось в пределах паспортных значений этого реле (паспорт РС4529.744). Время задержки информационного сигнала по каналу преобразователя линейных перемещений к каналу преобразователя угловых перемещений не превысило:
- при срабатывании 0,007 с;
- при отпуске 0,0023 с.

В ы в о д ы

1. На основе выполненных исследований разработаны средства системы непрерывного определения положения сосудов в шахтном стволе, определяющие функциональные возможности устройств защиты от переподъема, превышения скорости (системы СТАРТ), защиту от напуска каната сосудов в стволе (аппаратура КОНТУР). Система непрерывного определения положения сосудов осуществляет отбор путевых команд в заданных точках ствола, формирование и индикацию параметров движения сосудов (местоположение, скорость), формирование сигналов для систем регулирования и управления подъемной машиной.

2. Экспериментальные исследования основных характеристик скрещенной и нескрещенной неоднородных петлевых линий и обработка результатов этих исследований свидетельствуют о приемлемости полученных аналитических формул (3.87) и (3.88) для расчета $\varepsilon_{дс}$, наводимых в неоднородных линиях при перемещении рамочной антенны передатчика.

3. Точность определения местоположения находится в пределах 0,025 м при $M=0,1$ м и определяется шагом M с учетом учетверения путевых импульсов преобразователя линейных перемещений и не зависит от глубины ствола.

4. Быстродействие индуктивных средств определяется в основном типом используемых исполнительного и промежуточного электромагнитных реле. Задержка информационного сигнала, по данным измерения и осциллографирования, в индуктивном канале средств защиты аппаратуры КОНТУР не превышает 0,002 с. В целом, быстродействие индуктивной аппаратуры с датчиком контроля натяжения каната равно 0,068 с. Время задержки информационного сигнала в индуктивном канале средств защиты системы СТАРТ с промежуточным реле типа РЭС-64 Б не превышает 0,007 с при срабатывании и 0,0023 с при отпуске реле, что является существенным фактором при создании быстродействующей аппаратуры защиты подъемных установок от аварийных режимов.

5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМЫ ПРИ ВНЕДРЕНИИ В ГОРНУЮ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ И ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДЪЕМОВ

5.1. Определение экономической эффективности

Проведенный сравнительный технико-организационный анализ /82/ разработанных и используемых в отечественной и зарубежной практике способов и средств определения местоположения сосудов в шахтном стволе показал, что сопоставленные варианты в разной степени отвечают требованиям быстродействия и надежности. Поэтому, в соответствии с теорией сравнительной экономичности сопоставляемых способов и средств, варианты, ухудшающие безопасность труда, не подлежат дальнейшему рассмотрению на предмет экономической целесообразности их разработки и внедрения. Известно /49,82/, что индуктивные каналы связи являются наиболее работоспособными и надежными в условиях вертикальных и наклонных шахтных стволов. В связи с этим расчет годового экономического эффекта разработки "системы с неоднородной петлевой линией" произведен в соответствии с /57,106/

$$\mathcal{E}_z = (C_n^I - C_n^{II}) A^{II}, \quad (5.1)$$

где C_n^I, C_n^{II} – приведенные народнохозяйственные затраты сопоставляемых вариантов контрольной аппаратуры в расчете на один комплект (I – базовый вариант; II – новый); A^{II} – объем внедрения новых средств контроля в расчетном году, шт. комплектов.

В качестве базового (I) варианта принят лучший из известных, отвечающих требованиям надежности, безопасности и быстродействия, вариант "система контроля с магнитными метками".

Расчет приведенных затрат C_n^I, C_n^{II} .

$$C_n^I = C_x^I + E_n K^I; \quad (5.2)$$

$$C_n^{II} = C_x^{II} + E_n K^{II}, \quad (5.3)$$

где C_x^I, C_x^{II} – себестоимость эксплуатации систем контрольной аппаратуры в течение года, соответственно по I и II вариантам, у.е./комплект; E_n – нормативный коэффициент эффективности капитальных затрат ($E_n = 0,15$); K^I, K^{II} – удельные капитальные затраты по сопоставляемым вариантам, у.е./компл.

Определение годового экономического эффекта по вариантам предполагает одинаковость непосредственных (либо конечных) производственных результатов при использовании сопоставляемых способов и средств. Учитывая, что система многофункциональна, необходимо базовый вариант (с магнитными метками) дополнить средствами, обеспечивающими тот же объем и качество рабочей технологической информации, необходимой для контроля и фиксации местоположения подъемных сосудов в стволе. Варианты должны быть скорректированы по производительности работы подъемных сосудов в целом. Поэтому базовый вариант необходимо дополнить:

- каналом переговорной связи;
- аппаратурой для нанесения магнитных меток на маркерный канат;
- объемом регламентных работ по периодическому стиранию и нанесению новых магнитных меток, что должно найти отражение при расчете себестоимостных и капитальных затрат C_x^I и K^I .

При этом в расчете условно принято, что периодическое нанесение магнитных меток производится в свободное от выполнения технологической работы время. Если необходимость срочного нанесения магнитных меток (например, их размагничивание при сварочных работах вблизи ствола) сдерживает производительность основных технологических процессов, то по базовому варианту необходимо учитывать дополнительные затраты от простоя технологических взаимосвязанных звеньев.

Тогда

$$\mathcal{E}_z = [(C_x^I - C_x^{II}) \pm E_n (K^I - K^{II})] A^{II}. \quad (5.4)$$

Расчет эксплуатационных годовых затрат C_x^I, C_x^{II} .

Поскольку для определения величины \mathcal{E}_z нас интересует $\Delta C_x = C_x^I - C_x^{II}$, то ограничимся расчетом лишь различающихся элементов затрат по вариантам, в этом случае различающимися элементами будут:

- C_a – годовые затраты по амортизации комплектов аппаратуры;
- C_p – годовые затраты по ремонту комплектов аппаратуры и производство профилактических работ;
- C_3 – годовые затраты по электроэнергии для технологических целей;
- C_m – затраты на производство разметочных работ (только для I варианта).

Расчет годовых амортизационных затрат

$$C_a = \sum_{i=1}^n \frac{K_{oi} \alpha_{oi}}{100}, \quad (5.5)$$

где K_{oi} – стоимость i -того оборудования, входящего в комплект технологической аппаратуры (включая нестандартное оборудование и линии связи) по варианту, у.е./оборудов.; α_{oi} – норматив годовых амортизационных отчислений, идущих на реновацию, %; n – число входящих элементов комплексной аппаратуры по варианту.

Расчет годовых затрат на ремонт (ППР).

$$C_p = \sum_{i=1}^n \frac{K_{oi} \alpha_{oi}}{100}, \quad (5.6)$$

где α_{oi} – норматив затрат на производство всех видов ППР (планово-пре-дупредительного ремонта) в течение года (% от стоимости i -того технологического оборудования).

Расчет затрат на электроэнергию (технологическую)

$$C_{\varepsilon} = \sum_{d=1}^h \frac{N_{yd} R_n R_w t_p}{\eta_d} C_{\varepsilon}, \quad (5.7)$$

где N_{yd} – установленная мощность d -того энергопотребляющего устройства, используемого по варианту, кВт; R_n – коэффициент использования устройства по мощности; R_w – коэффициент, учитывающий потери электроэнергии в сети предприятия; η_d – $\kappa n d$ d -го энергопотребляющего устройства; t_p – среднее время работы в год d -го оборудования, час; C_{ε} – цена 1 киловатт-часа электроэнергии, у.е./кВт.час.

Если потребление электроэнергии приемно-передающим устройством и устройством, преобразующим сигнал, по вариантам можно (вследствие их незначительности) считать равным, то расчету подлежит дополнительный расход электроэнергии по 1 варианту на кратковременные включения двигателя подъемной машины при остановках подъемных сосудов в стволе, т.к. вариант дает известные погрешности определения местоположения сосуда.

Расчет годовых затрат на производство разметочных работ по базовому варианту. Эти затраты состоят из следующих элементов:

$$C_M = [\sum_{i=1}^n C_{zmi} + \sum_{j=1}^m C_{aj} + C_{\varepsilon(an)} + C_{\varepsilon(\delta\theta)}] N_{\Gamma}, \quad (5.8)$$

где C_{zmi} – заработная плата i -того числа бригады наладчиков, занятых на маркировке магнитными метками каната, с учетом затрат времени на демонтаж передающего полуккомплекта, монтажа специальной аппаратуры для стирания старых и нанесения новых меток, самой маркировки и опробования линии связи, т.е. всего комплекса взаимосвязанных работ по проведению 1 маркировки каната принятой длины; n – количество человек, занятых на этой работе; C_{aj} – амортизация j -го оборудования, используемого при нанесении меток, приходящаяся на 1 маркировку (в части, идущей на реновацию и капитальный ремонт); m – количество используемого оборудования (приборы, другое оборудование всего комплекса шахтного подъема); $C_{\varepsilon(all)}$ – затраты на электроэнергию, затрачиваемую аппаратом при стирании и нанесении меток на маркерный канат заданной длины; $C_{\varepsilon(\delta\theta)}$ – затраты на электроэнергию, потребляемую электроприводом подъемной машины, работающим в течение всего времени маркировки в режимах, обеспечивающих требуемое качество стирания и записи меток; N_{Γ} – среднее число маркировок в год.

В свою очередь

$$C_{zmi} = C_{c\kappa i} t_i k_1 k_2 k_{c-c}, \quad (5.9)$$

где $C_{c\kappa i}$ – среднечасовая тарифная ставка наладчика i -той квалификации; k_1 – коэффициент, учитывающий дополнительную заработную плату (премии, надбавки); k_2 – районный коэффициент; k_{c-c} – коэффициент, учитывающий начисления в соцстрах; t_i – фактически отработанное время при проведении работы по маркировке каната заданной (средней) длины.

$$C_{aj} = \sum_{j=1}^h \frac{K_{oi} \alpha_{aj} t_j}{100 F_{\varepsilon\phi}}, \quad (5.10)$$

где α_{aj} – норма годовых амортизационных отчислений (идущих на реновацию и капитальный ремонт) для j -того оборудования; $F_{\varepsilon\phi}$ – годовой эффективный фонд времени работы оборудования в час; t_j – количество часов работы j -того оборудования при проведении одной маркировки, час; затраты $C_{\varepsilon(all)}$ и $C_{\varepsilon(\delta\theta)}$ – рассчитываются по аналогии (5.7).

Расчет капитальных затрат. Поскольку для расчета ε_{Γ} вновь представляет интерес величина $\Delta K = K^I - K^{II}$, то расчету подлежат лишь различающиеся по вариантам элементы капитальных затрат. Такими различающимися затратами будут:

$$K^I = K^I_{Перу} + K^I_{Прву} + K^I_{M\mu} + K^I_{MK} + K^I_{нест}; \quad (5.11)$$

$$K^{II} = K^{II}_{Перу} + K^{II}_{Прву} + K^{II}_{нл} + K^{II}_{нест}, \quad (5.12)$$

где $K^I_{Перу}$, $K^{II}_{Перу}$ – капитальные вложения в передающие устройства по вариантам; $K^I_{Прву}$, $K^{II}_{Прву}$ – то же в приемные устройства; $K^I_{нл}$, $K^{II}_{нл}$ – то же в нестандартное оборудование для реализации вариантов; K_M – капитальные затраты в оборудование для нанесения магнитных меток на маркерный канат; μ – коэффициент занятости оборудования для маркировки одного каната с учетом возможности его использования для других подъемов;

$K_{нд}$ – капитальные затраты на изготовление и монтаж конструкций с неоднородными петлевыми линиями; $K_{мк}^I$ – капитальные вложения в маркерный канат.

Данные для расчета сведены в табл.5.1, сопоставительный расчет эксплуатационных затрат – в табл.5.2, расчет капитальных затрат по вариантам – в табл.5.3.

Таблица 5.1

Условные обозначения входящих в формулы величин	Численные значения	Примечания
$K_{Перу}^I + K_{Прю}^I + K_{Бил}^I$, у.е.	2450	Смета затрат (приобретение, монтаж)
$K_{Перу}^{II} + K_{Прю}^{II} + K_{Бил}^{II}$, у.е.	3000	Смета затрат (приобретение, модернизация, монтаж)
$K_{мк}^I$, у.е.	1500	Ценник на оборудование
$K_{мк}^{II}$, у.е.	500	Ценник на оборудование
$K_{нест}^I$, у.е.	500	Смета затрат (изготовление, монтаж)
$K_{нест}^{II}$, у.е.	1100	$K_{нест} = \sigma_m + \Pi_o \cdot k_{т-м}$, где σ_m - вес нестандартного оборудования, кг; Π_o - усредненная стоимость одного кг нест. обор., у.е./кг; $k_{т-м}$ – коэффициент, учитывающий транспортные расходы (1.1)
$N_{y(бв)}$, кВт	500	Паспорт на оборудование
$N_{y(ап)}$, кВт	0,1	Паспорт на оборудование
K_N	0,8	Паспорт на оборудование
K_w	1,1	Отчетные данные шахтоуправления
t_p , час.	26	Среднестатистические данные
$\alpha_{аб}$, %	20	Действующие нормативы амортизации отчислений
η	0,9	Паспортные данные
$C_{сч}$ (III разряда), у.е./час.	1,1	Тарифно-квалификационный справочник
$C_{сч}$ (V разряда), у.е./час.	1,5	Тарифно-квалификационный справочник
K_1	1,7	Данные работы шахт
K_2	1,15	Действует районный коэффициент
$K_{с-с}$	1,1	Нормативная величина
t_i , час	5800	Данные работы шахт
$F_{эф}$, час.	1,5	Статистические данные
N_s , раз.	12	Статистические данные
$K_{ом}$		Балансовая стоимость (данные шахты)
$\alpha_{ри}$, %	13	Нормативы отчислений на ремонт оборудования

Таблица 5.2

Расчет эксплуатационных затрат по вариантам

Различающиеся элементы затрат	Расчетные формулы	Расчеты затрат	Результаты расчетов, у.е.	
			I вар.	II вар.
1	2	3	4	5
Затраты по амортизации комплектов аппаратуры контроля	$C_a = \sum_{i=1}^n \frac{K_{oit} \alpha_a}{100}$	$C_a^I = (2450+1500+500+1100) * 20 : 100$ $C_a^{II} = (3000+500+550) * 20 : 100$	1100	810
Затраты на ремонт оборудования и техническое обслуживание	$C_p = \sum_{i=1}^n \frac{K_{oit} \alpha_p}{100}$	$C_p^I = (2450+500+1100+1500) * 13 : 100$ $C_p^{II} = (3000+500+550) * 13 : 100$	722	527
Расчет затрат по электроэнергии на технологические цели	$C_э = \frac{N_{yd} K_n K_w t_p}{\eta} \Pi_э$	$C_э^I = (500 * 0,8 * 1,1 * 26) : 0,9 * 0,02$	254	-
Затраты по разметке каната:	$C_{зн} = \sum_{j=1}^n C_{счj} t_j K_1 K_2 K_{с-с}$	$C_{зн}^I = (1,1 * 1,7 * 1,15 * 1,1 * 1,5 * 12) + (1,5 * 1,7 * 1,15 * 1,1 * 1,5 * 12)$	144,7	-
а) зарплата	$C_a = \sum_{j=1}^n \frac{K_{oit} \alpha_a t_i}{100 F_{эф}}$	$C_a^I = (500 * 20 * 18) : (100 * 4020)$	0,1	-
б) амортизация		$C_{э(ап)}^I = (0,1 * 1,0 * 1,1 * 18) : 0,9 * 0,02$	154	-
в) электроэнергия	$C_{зн} = \frac{N_e K_n K_w t_i}{\eta} \Pi_э$	$C_{э(бв)}^I = (500 * 0,7 * 1,1 * 18) : 0,9 * 0,02$		
Итого эксплуатационных затрат:			2284,7	1337,0

Таблица 5.3

Условные обозначения капитальных затрат	Затраты ед. (у.е.)	Суммарные капитальные, затраты, у.е.
---	--------------------	--------------------------------------

		I вар.	II вар.
$K_{Перу}^{I} + K_{Приву}^{I} + K_{бу}^{I}$	2450	2450	-
$K_{Перу}^{II} + K_{Приву}^{II} + K_{бу}^{II}$	3000	-	3000
$K_{мк}^{I}$	1500	1500	-
$K_{нест}^{I}$	1100	1100	-
$K_{нест}^{II}$	550	-	550
$K_{м}^{I}$ (при $\mu=1,0$)	500	500	-
$K_{из}$	500	-	500
Итого капитальных затрат:		5500	4050

Тогда годовой экономический эффект от внедрения средств системы непрерывного определения положения сосудов в стволе в расчете на 1 комплект будет равен:

$$\mathcal{E}_z = 947,7 + 0,15(5550 - 4050) = 947,7 + 225 = 1172 \text{ у.е./год 1 компл.}$$

Следует отметить, что расчет выполнен без учета:

- C_a – всего шахтного подъема (из расчета $1,5 \cdot 12$ час. по формуле (5.10), где $F_{эф}$ – время работы подъема при трехсменной работе в год);
- условно принято, что маркировка каната магнитными метками осуществляется в часы профилактики ствола, поэтому, если возникает потребность (в результате стирания) в нанесении магнитных меток в рабочее время (время выполнения основных технологических операций), то расчет должен быть скорректирован на рост производительности работы подъема.

5.2. Оценка повышения безопасности

В работе /43/ отмечается, что некоторые несчастные случаи и аварийные ситуации на подъемных установках можно было бы предотвратить при своевременной оценке средств безопасности. Следовательно, оценка степени безопасности применяемых технических решений средств защиты предполагает прогнозирование безопасных условий труда и безаварийных режимов при эксплуатации подъемов. Существует несколько методов (качественных и количественных) прогнозирования: интуитивный (качественный) метод; технический, статистический и вероятностный (количественные), которые были рассмотрены при анализе аварий (разд. 1). При использовании корреляционного и вероятностного методов прогнозируется интенсивность травматизма (аварий) или его вероятность /68/. Прогноз в этом случае состоит из расчета интенсивности или вероятности травматизма (аварий) для принимаемого технического решения средств защиты. Путем сопоставления полученных данных надежных характеристик с фактическими значениями существующих средств защиты оценивается качество технического решения с точки зрения обеспечения повышения безопасности. Применение корреляционного и вероятностного методов для прогноза повышения безопасности при использовании технического решения позволяет, в случае неудовлетворительного прогноза, вскрыть факторы, ухудшающие безопасность и наметить меры по ее повышению /22/. Таким образом, использование корреляционного и вероятностного методов анализа совместно с надежным методом открывает возможности конструирования средств защиты по фактору повышения безопасности эксплуатации любого объекта, в том числе подъемных установок.

Произведем оценку повышения безопасности эксплуатации подъемной установки при использовании разработанных средств защиты от переподъема (превышения скорости). В качестве базы для сравнения примем широко известные ограничители скорости подъемных установок ЭОС-2 и ЭОС-3У. При этом в целях сопоставимости характеристик (формулы (1.12)-(1.14)) и с учетом требований (разд.2) расчет параметров надежности выполним только для электрических схем, соответственно ЭОС-2, ЭОС-3У /61,95/ и КОНТУР, СТАРТ (прилож.6,7). Расчетные значения интенсивностей отказов и вероятностей безотказной работы (ВБР) указанных средств защиты, полученные в соответствии с /22,24, 31,94/, сведены в табл.5.4-5.7

Таблица 5.4.

Расчет показателей надежности ЭОС-2

Тип элементов	Число элементов определенного типа N_i	Интенсивность отказов элементов определенного типа $\lambda_i \cdot 10^{-6}$, 1/час	Произведение $N_i \cdot \lambda_i \cdot 10^{-6}$, 1/час
Конденсатор	20	0,95	19
Резистор	32	0,30	9,6
Диод	60	4,73	283,8
Транзистор	4	6,65	14,6
Дроссель	4	6,0	24,0
Катушка индуктивности	2	3,0	6,0
Силовой трансформатор	4	12,0	48,0
Выходной трансформатор	4	2,0	8,0
Реле	5	77,5	387,5

Тахогенератор	2	6,28	12,56
Сельсин	2	0,61	1,22
Предохранитель	1	4,5	4,5
Разъем	14	0,85	11,9
Галетный переключатель	3	2,15	6,45
Переключатель малогабаритный	14	1,62	22,68
Контакты реле	35	0,35	12,25
Кнопка	5	5,65	23,25
Пайка объемная	134	0,05	6,7
Соединение с зажимом	117	1,02	113,34
Лампа сигнальная	4	2,8	11,2
И т о г о:		$\Sigma\lambda = 1037,55$	

$$P(t) = P(720) = \exp(-1037,55 \cdot 10^{-6} \cdot 720) = 0,4737 \quad (5.13)$$

Таблица 5.5

Расчет показателей надежности ЭОС-ЗУ

Тип элементов	Число элементов определенного типа N_i	Интенсивность отказов элементов определенного типа $\lambda_i \cdot 10^{-6}$, 1/час	Произведение $N_i \cdot \lambda_i \cdot 10^{-6}$, 1/час
1	2	3	4
Пускатель магнитный	2	1,19	2,38
Реле	1	77,5	77,5
Трансформатор	9	12,0	108,0
Тумблер	3	3,23	9,69
Элемент "Логика"	2	4,0	8,0
Разъем	14	0,85	11,9
Переключатель галетный	3	2,15	6,45
Кнопка	2	5,65	11,3
Тиристор	2	5,0	10,0
Конденсатор	18	0,95	17,1
Резистор	23	0,3	6,9
Диод	66	4,73	312,8
Стабилитрон кремниевый	4	1,35	5,4
Лампа сигнальная	4	2,8	11,2
1	2	3	4
Автоматический выключатель	1	5,08	5,08
Сельсин	2	0,61	1,22
Тахогенератор	2	6,28	12,56
Пайка объемная	251	0,05	12,55
Соединение с зажимом	32	1,02	32,64
И т о г о:		$\Sigma\lambda = 662,05$	

$$P(t) = P(720) = \exp(-662,05 \cdot 10^{-6} \cdot 720) = 0,6208 \quad (5.14)$$

Таблица 5.6

Расчет показателей надежности 1 канала КОНТУР

Тип элементов	Число элементов определенного типа N_i	Интенсивность отказов элементов определенного типа $\lambda_i \cdot 10^{-6}$, 1/час	Произведение $N_i \cdot \lambda_i \cdot 10^{-6}$, 1/час
ПЕРУ	1	48,1	48,1
ПРИУ	1	67,1	98,8
Блок индикации	1	14,0	14,0
Блок питания	1	38,2	38,2
И т о г о:		$\Sigma\lambda = 199,10$	

$$P(t) = P(720) = \exp(-199,10 \cdot 10^{-6} \cdot 720) = 0,8664 \quad (5.15)$$

Таблица 5.7

Расчет показателей надежности 1 канала СТАРТ

Тип элементов	Число элементов определенного типа N_i	Интенсивность отказов элементов определенного типа $\lambda_i \cdot 10^{-6}$, 1/час	Произведение $N_i \cdot \lambda_i \cdot 10^{-6}$, 1/час
ПЕРУ	1	50,9	50,9
ОНПЛ (ДМ)	3	2,45	7,35
ПРИУ	1	119,1	119,1
ФПИ	1	72,9	72,9
ДБ	1	95,2	95,2
И т о г о:		$\Sigma\lambda = 345,45$	

В соответствии с (1.17) осуществим прогнозирование смертельных несчастных случаев из-за переподъема, на подъемных установках в 1999 г., для которого $\lambda=9,2$. Подставив это значение в (1.17), найдем величину интенсивности травматизма в 1999 г., которая составит

$$\lambda_2(x) = 9,1-2,95*9,2+0,25*9,2^2=3 \text{ сл./год.}$$

Далее, подставляя (5.17) в (1.8), найдем

$$a = 3 * \Delta t = 3, \text{ где } \Delta t = 1 \text{ год.} \quad (5.18)$$

Следовательно, вероятность того, что в заданных условиях произойдет несчастный случай, равна по (1.9)

$$p = 1 - \exp(-3) = 0,9502 \quad (5.19)$$

а вероятность работы без травм

$$q = 1 - p = 1 - 0,9502 = 0,0497 \quad (5.20)$$

Таким образом, с учетом рассчитанных значений ВБР для четырех технических решений средств защиты (выражения (5.13)-(5.16)), общая вероятность безаварийной работы подъемной установки с учетом (1.11) определится:

$$P(t)_{\text{эос 2}} = 0,4737 * 0,0497 = 0,0235; \quad (5.21)$$

$$P(t)_{\text{эос 3у}} = 0,6208 * 0,0497 = 0,0309; \quad (5.22)$$

$$P(t)_{\text{контур}} = 0,8664 * 0,0497 = 0,0431; \quad (5.23)$$

$$P(t)_{\text{старт}} = 0,7797 * 0,0497 = 0,0398. \quad (5.24)$$

Следовательно, общая вероятность возникновения, хотя бы одной смертельной травмы (аварии), при использовании каждого из указанных аппаратов защиты будет иметь значение

$$P(t)_{\text{эос 2}} = 1 - 0,0235 = 0,9765; \quad (5.25)$$

$$P(t)_{\text{эос 3у}} = 1 - 0,0309 = 0,9691; \quad (5.26)$$

$$P(t)_{\text{контур}} = 1 - 0,431 = 0,9569; \quad (5.27)$$

$$P(t)_{\text{старт}} = 1 - 0,381 = 0,9612. \quad (5.28)$$

Из приведенного анализа (5.17...5.28) следует, что самым ненадежным из рассматриваемых средств защиты является ограничитель скорости ЭОС-2. Уровень возникновения аварийной ситуации при эксплуатации подъемных установок, оборудованных аппаратом ЭОС-2, является наиболее высоким; далее следует аппарат ЭОС-3У. Очевидно, электромеханические аппараты типа ЭОС-2, ЭОС-3У целесообразно заменять разработанными средствами защиты /80-82/.

Выводы

1. Расчетный экономический эффект от внедрения одного комплекта средств определения положения судов в стволе, составляет 1172 у.е./год на 1 комплект.

2. По выполненной оценке, разработанные средства защиты подъемных установок от переподъема (превышения скорости) способствуют повышению безопасности эксплуатации. Степень возникновения аварийной ситуации при использовании разработанных средств на подъеме является наиболее низкой по сравнению с аппаратами электромеханического типа ЭОС-2, ЭОС3У, оценочная вероятность безотказной работы которых составляет: для ЭОС-2 – $P(720)=0,47$; для ЭОС-3У – $P(720)=0,62$. Для разработанных средств ВБР составляет соответственно: для аппаратуры КОНТУР – $P(720)=0,87$; для системы СТАРТ – $P(720)=0,78$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненных исследований в данной работе сделаны следующие основные выводы и рекомендации.

1. Современная тенденция к увеличению глубины шахтных стволов, грузоподъемности и скорости подъемных сосудов требует создания новых средств непрерывного (непосредственного и косвенного) определения положения сосудов в стволе с использованием вычислительной (микропроцессорной) техники – для надежной защиты подъемных установок от аварий и аварийных ситуаций.

2. На основании анализа аварий и несчастных случаев, связанных с движением подъемных сосудов в стволе, установлены корреляционные зависимости между интенсивностью травматизма (авариями) и степенью совершенства средств защиты от переподъема (превышения скорости), позволяющие осуществить прогнозирование несчастных случаев с целью их предупреждения в будущем.

3. Анализ способов и средств косвенного и непосредственного определения местоположения сосудов выявил идентичность технических решений перспективных преобразователей линейных и угловых перемещений, что позволило сформулировать требования к их качественным (надежностным) и количественным (точностным) характеристикам, схемному построению и реализации.

4. Предложенные способы реверсивного режима работы преобразователей линейных перемещений позволяют осуществить учетверение информационных сигналов о перемещении на интервале шага неоднородных линий и вчетверо повысить точность определения положения сосудов в стволе.

5. На основе аналитических исследований свойств неоднородных петлевых линий получены расчетные формулы для определения уровня сигнала, наводимого в них рамочной антенной передающего устройства при различных конструктивных параметрах шага, ширины, формы неоднородностей, расстояния между ними.

Получены аналитические зависимости, позволяющие оптимизировать указанные параметры, а также выполнить необходимые расчеты по разработанным для ЭВМ программам расчетов параметров и функций.

6. Использование преобразователя линейных перемещений в виде неоднородных линий позволяет осуществить комплексное решение задач по повышению безопасности и эффективности эксплуатации подъемных установок, связанных с движением сосудов; обеспечить защиту от переподъема, превышения скорости, напуска каната и др., а также обеспечить точный останов, лифтовой режим работы, программирование скорости по пути. Совместное применение реверсивной неоднородной и однородной петлевых линий позволяет также осуществить непрерывную передачу информационных сигналов из движущегося подъемного сосуда (клетки) и обеспечить выполнение функций контроля, управления, сигнализации и связи одними и теми же индуктивными элементами, что является важным при создании и совершенствовании комплексов шахтных подъемных установок.

7. На основе исследований разработаны быстродействующие средства непрерывного определения параметров движения подъемных сосудов (аппаратура КОНТУР, система СТАРТ), обеспечивающие при помощи датчиков контроля безопасности и преобразователей линейных и угловых перемещений выполнение необходимых функций защиты с высоким быстродействием и точностью определения положения сосудов в стволе, равной четверти шага неоднородности линий.

Система непрерывного определения положения подъемных сосудов позволяет также осуществить отбор путевых команд в заданных точках ствола, формирование и индикацию параметров движения (местоположения, скорости) сосудов, формирование задающих сигналов для систем регулирования и управления подъемной машиной.

Значимость такой системы возрастает с увеличением глубины ствола шахты и необходимостью применения многорежимных подъемов, связывающих между собой различные горизонты при разных значениях установившихся скоростей, ускорений, рывков.

8. Проведенные испытания индуктивных средств в условиях стволов шахт «Новая» и «Восточная» Хайдарканского ртутного комбината показали соответствие результатов экспериментальных и теоретических исследований. Результаты аналитических и экспериментальных исследований использованы при разработке технического задания на унифицированную информационно-измерительную систему для повышения эффективности и безопасности работы подъемов с применением микропроцессорной техники.

9. Разработанные и изготовленные опытно-промышленные комплекты аппаратуры защиты от аварийных режимов внедрены в промышленных условиях и обеспечивают высокую эффективность и безопасность эксплуатации рудничных подъемов.

10. Разработанные методы и технические средства являются основой построения и совершенствования систем автоматического управления всеми режимами работы, характерными для подъемных установок: спуск и подъем людей, транспортирование груза, маневровые операции, предохранительное торможение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. 1167136 (СССР). Устройство для контроля натяжения каната подъемного сосуда /ФПИ авт. изобрет. П.И. Пахомов и др. – Заявл. 09.01.84, № 3689781/27-11; Опубл. в Б.И., 1985, № 26.
2. А.с. 1183443 (СССР). Устройство для контроля натяжения каната /ФПИ авт. изобрет. А.В. Прахов, М.М. Шамсутдинов, П.И. Пахомов, Э.Ш. Шабданалиев. – Заявл. 29.12.83, № 3680491/29-11; Опубл. в Б.И., 1985, № 37.
3. *Айбиндер И.М.* Входные каскады радиоприемников. – М.: Связь, 1973. – 328 с.
4. *Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д.* Прикладная статистика. – М.: Финансы и статистика, 1983.
5. *Анго А.* Математика для электро- и радиоинженеров /Пер. с франц.: Под ред. К.С. Шифрина. – М.: Наука, 1965. – 772 с.
6. *Ари Э.И.* Автогенераторные методы и средства измерения. – М.: Машиностроение, 1979. – 256 с.
7. *Бабочкин И.А.* Система безопасности труда на горных предприятиях. – М.: Недра, 1984.
8. *Баскаков С.И.* Радиотехнические цепи с распределенными параметрами. – М.: Высш.школа, 1980. – 152 с.
9. *Белоцерковский А.А.* и др. Использование магнитной записи на канате для управления многоканатными подъемными установками. – Механизация и автоматизация производства, 1971, №:, с.25-28.
10. *Белоцерковский А.А.* Определение минимально допустимых расстояний между магнитными метками на стальном канате. – Изв.вузов. Горный журнал, 1964, № 11, с.167-173.
11. *Белоцерковский А.А., Кирюшин Ю.В.* Дискретно-аналоговый преобразователь для определения параметров движения подъемной машины //Вопросы разработки шахтных стационарных установок: Сб. науч. тр. /ВНИИГМ им. М.М. Федорова. – Донецк, 1982. – с.164-173.
12. *Белоцерковский А.А., Шапочка Н.В., Никитин В.Н., Круть А.А.* Защита от напуска каната при застревании подъемного сосуда в стволе //Безопасность труда в промышленности. – 1977. – № 4. – с.30-31.
13. *Бизин И.В., Шунов В.П., Пащенко Ю.А.* Бесконтактное устройство контроля местоположения шахтного подъемного сосуда //Горный журнал. – 1968. – № 6. – с.59-61.
14. *Бобров Н.В.* Радиоприемные устройства. – М.: Энергия, 1976. – 368 с.
15. *Борзов М.И.* Индуктивные преобразователи угла в код. – М.: Энергия, 1970. – 72 с.
16. *Бухгольц В.П.* Датчики и реле автоматического контроля в горной промышленности. – М.: Недра, 1971. – 224 с.
17. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. – М.: Наука, 1973. – 365 с
18. *Виленский П.И., Срибнер Л.А.* Бесконтактные путевые выключатели. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 80 с.
19. *Волгов В.А.* Детали и узлы радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Энергия, 1977. – 656 с.
20. *Волошин В.Н., Трибухин В.А.* Новые способы непосредственного отбора путевой информации шахтных подъемных установок //Вопросы разработки шахтных стационарных установок: Сб. науч. тр. /ВНИИГМ им. М.М. Федорова. – Донецк, 1982. – с.161-164
21. *Вольман В.И., Пименов Ю.В.* Техническая электродинамика. – М.: Связь, 1971. – 487 с.
22. Вопросы математической теории надежности /Е.Ю. Барзилович, Ю.К. Беляев, В.А. Каштанов и др., Под ред. Б.В. Гнеденко. – М.: Радио и связь, 1983.
23. *Вульвет Дж.* Датчики в цифровых системах /Пер. с англ.; Под ред. А.С. Яроменка. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 200 с.
24. *Глазунов Л.П., Грабовецкий В.П., Щербаков О.В.* Основы теории надежности автоматических систем управления. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отделение, 1984. – 208 с.
25. *Головинский И.О.* Средства и системы управления рудничными подъемными установками: Обзор /Сер. механизация и автоматизация производственных процессов. – М.: 1972. – 40 с.
26. *Головинский О.И.* Исследование и разработка бесконтактной системы передачи сигналов при автоматизации управления шахтными клетевыми подъемными машинами. Автореф. дисс. канд. техн. наук. – М., 1969. – 15 с.
27. *Гольдштейн Л.Д., Зернов Н.В.* Электромагнитные поля и волны. – М.: Сов.радио, 1971. – 664 с.
28. Госгортехнадзор СССР. Техническое управление. О предупреждении травматизма на подземном транспорте и подъемах в горнорудной и нерудной промышленности. Информационный бюллетень. – № 11 (796)-84. – М., 1984, с.24-32.
29. Госгортехнадзор СССР. Техническое управление. Об авариях на подъемных установках угольных шахт: Информационный бюллетень. – № 24 (622)-30. – М., 1980, с.3-5.
30. *Гречинский Д.А., Рыгалин В.Г.* Магнитоиндуктивные установки оперативной связи. – М.: Связь, 1970. – 72 с.

31. Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных систем. – М.: Энергия, 1977. – 526 с.
32. Дьяконов В.Н. Расчет нелинейных и импульсных устройств на программируемых микрокалькуляторах. – М.: Радио и связь, 1984. – 176 с.
33. Дьяконов В.П. Справочник по расчетам на микрокалькуляторах. 2-е изд., испр. – М.: Наука, 1986. – 224 с.
34. Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений подъемным способом. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1977. – 223 с.
35. Екимов В.Д. Расчет и конструирование транзисторных радиоприемников. – М.: Связь, 1972. – 216 с.
36. Защита рудничных подъемных установок от напуска каната на предприятиях цветной металлургии /И.Н. Латыпов, С.Н. Дьяченко, В.Ф. Меньшиков: Обзор; ЦНИИЦВЕТМЕТ экономики и информации. – М.: 1984, вып.4. – 56 с.
37. Иванов А.А. Средства автоматической защиты шахтных подъемных установок от переподъема. – М.: Углетехиздат, 1953.
38. Кавецкий З., Стахурский Я. Магнитная дефектоскопия стальных канатов /Пер. с пол. И.Б. Доржинкевича. – М.: Недра, 1974. – 176 с.
39. Каганов В.И. Транзисторные радиопередатчики. – М.: Энергия, 1976. – 348 с.
40. Калихман С.Г., Левин Я.М. Основы теории и расчета радиовещательных приемников на полупроводниковых приборах. – М.: Связь, 1969. – 480 с.
41. Киричок Ю.Г., Чермалых В.М. Привод шахтных подъемных установок большой мощности. – М.: Недра, 1972. – 336 с.
42. Киричок Ю.Г., Чернобай Г.Н., Дектерев В.Ф. и др. Высокочастотная связь и сигнализация в вертикальных стволах шахт Кривбасса /Горный журнал. – 1980. – № 4. – с.43-45.
43. Клейнзи Т.К., Люксмор К. Электромеханические и электротехнические требования безопасности при перевозке людей и материалов в стволах и подземных выработках: Пер.с англ.: реферат /Ассоциация горных инженеров, механиков и электриков; симпозиум по перевозке людей и материалов в стволах и подземных выработках. – Лондон, 1975. – 32 с.
44. Ключев В.И. Ограничение динамических нагрузок электропривода. – М.: Энергия, 1971. – 320 с.
45. Комплекс аппаратуры СИГНАЛ-16. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ЭМ1.270.008 ТО/Сев.-Кав. филиал ВНИКИ Цветметавтоматика. – Орджоникидзе, 1983. – 95 с.
46. Комплекс аппаратуры СИГНАЛ-17. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ЗМ1.270.009 ТО /Сев.-Кав. филиал ВНИКИ Цветметавтоматика. – Орджоникидзе, 1985. – 152 с.
47. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1984. – 832 с.
48. Корнилов В.Д., Киричок Ю.Г. Основы безопасной и высокопроизводительной работы подъемных установок на рудниках. – М.: Госгортехиздат, 1961. – 164 с.
49. Корректировка техдокументации и изготовление аппаратуры контроля напуска каната АПИК-2М: Отчет /ФПИ; Руководитель работы П.И. Пахомов. – № ГР 81028672; Инв.№ 02830026877. – Фрунзе, 1983. – 283 с.
50. Кривенков В.В. Автоматический контроль и проверка преобразователей угловых и линейных величин. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1986. – 247 с.
51. Кузусhev А.М., Голубева Н.С. Основы радиоэлектроники. – М.: Энергия, 1969. – 380 с.
52. Литвиненко О.Н., Сошников В.И. Теория неоднородных линий и их применение в радиотехнике. – М.: Сов. радио, 1964. – 536 с.
53. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. – М.: Энергия, 1979. – 392 с.
54. Марголин Ш.М., Гуров А.С. Функциональные узлы схем автоматического управления: Справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 168 с.
55. Масляный А.С., Дектярев В.Ф., Ицкович Л.Ю. и др. Средства микропроцессорной техники для управления шахтными подъемными и вентиляторными установками. – Горный журнал, 1985, № 12, с.16-19.
56. Мелик-Шахназаров А.М., Маркатун М.Г. Цифровые измерительные системы корреляционного типа. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 128 с.
57. Методика (основные положения) определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. – М.: 1977. – 20 с.
58. Методические указания по техническому осмотру и испытаниям эксплуатационных и проходческих подъемных установок /В.П. Пивоваров, В.С. Одегов, В.Р. Иванов, Ю.П. Смирнов, В.А. Макаров, В.В. Никулин: ЦНИИцветмет экономики и информации. – М., 1985. – 41 с.
59. Миц В.Н. Некоторые результаты исследования магнитной записи на стальных канатах //Горная электромеханика и автоматика. – 1966, вып.5. – с. 27-31.
60. Муравьев О.Л. Радиопередающие устройства. – М.: Связь, 1974. – 320 с.
61. Мурзин В.А., Решетников В.И., Шатило А.Н. Защита рудничных подъемных установок от превышения скорости. – М.: Недра, 1974. – 176 с.

62. *Носырев Б.А., Пахомов П.И.* Цифроаналоговая система управления электроприводом подъемной установки в функции местоположения сосуда в стволе //1 Всесоюзн. Семинар. – Проблемы разработки полезных ископаемых в условиях высокогорья. – Тез. докл. /ФПИ. – Фрунзе, 1987. – с.143-144.
63. О мерах по усилению надзора за эксплуатацией шахтных подъемных установок на предприятиях цветной металлургии. Директивное указание заместителя министра цветной металлургии СССР от 7 сентября 1984 г., КА-14029/40, г. Москва.
64. О результатах расследования аварии и группового несчастного случая на Холстинском руднике Садонского свинцово-цинкового комбината. Приказ министра цветной металлургии СССР от 24 сентября 1984 г., № 501, г.Москва.
65. *Огороднейчук И.Ф., Журавлев И.Я., Яцышин В.Л.* Низкочастотная беспроводная связь в шахтах. – М.: Недра, 1975. – 232 с.
66. *Онищенко А.М., Черняк З.А., Гейхман Н.Л.* Современное состояние и тенденции развития автоматического управления горными машинами и комплексами за рубежом: Обзор; ЦНИИУголь. – М., 1984. – 65 с.
67. *Отт Г.* Методы подавления шумов и помех в электронных системах /Пер. с англ. Б.Н. Бронина. – М.: Мир, 1979. – 317 с.
68. Охрана труда /К.З. Ушаков, В.Ф. Кирин, Н.В. Ножкин и др.; Под ред. К.З. Ушакова. – М.: Недра, 1986. – 624 с.
69. *Пасковатый О.И.* Электрические помехи в системах промышленной автоматики. – М.: Энергия, 1973. – 104 с.
70. *Пахомов П.И.* К вопросу о контроле хода подъемного сосуда в стволе шахты //Совершенствование технологии добычи и механизации горных работ на угольных предприятиях Киргизии: Сб. науч. тр. /ФПИ. – Фрунзе, 1983. – с.88-94.
71. *Пахомов П.И.* К вопросу об унифицированной информационно-измерительной системе для комплексной автоматизации подъемных установок //Механизация и автоматизация ручных и трудоемких операций в промышленности Кузбасса: Сб. тез. докл. /Кузбасск.политехн.ин-т. – Кемерово, 1984. – с.82-83.
72. *Пахомов П.И.* Методы и средства непрерывного определения положения сосудов с целью повышения безопасности эксплуатации рудничных подъемных установок: Дисс. канд. техн. наук. – Свердловск, 1989. – 264 с.
73. *Пахомов П.И., Шабданалиев Э.Ш., Алексеев И.А., Лупинин Э.В.* Информационная система для повышения эффективности и безопасности эксплуатации подъемных установок //1 Всесоюзн. Семинар. – Проблемы разработки полезных ископаемых в условиях высокогорья; Тез. докл. /ФПИ. – Фрунзе, 1987. – с.146-147.
74. *Пахомов П.И., Шабданалиев Э.Ш., Котлярская Т.В.* О способе определения состояния и целостности пружины парашютного устройства клетового подъема //Там же. – с.147-148.
75. *Подвойский В.К., Муфель Л.А.* Безопасность эксплуатации горных машин и комплексов. – Донецк: Донбасс, 1972.
76. *Подгорный А.Ф., Белоцерковский А.А.* Первичный преобразователь линейных перемещений //Изв. вузов. Электромеханика. – 1980. – № 10. – с.1055-1059.
77. Применение микроЭВМ для управления автоматизированными электроприводами шахтного подъема /В.Е. Католиков, В.В. Андриевский, В.С. Громов, А.Д. Динкель, В.П. Торбаев: Обзор /ЦНИЭИуголь. – М., 1985. – 65 с.
78. Проектирование датчиков для измерения механических величин / од общ. ред. Е.П. Осадчего. – М.: Машиностроение, 1979. – 480 с.
79. Пути повышения эффективности и безопасности эксплуатации подъемных установок: Отчет /ФПИ; Руководитель работы П.И. Пахомов. – № ГР 01860024414. – Фрунзе, 1987. – 153 с.
80. Разработка и внедрение средств определения параметров движения сосудов рудничных подъемных установок: Отчет /ФПИ; Руководитель работы П.И. Пахомов. – № ГР 01860024414; Инв.№ 0287020873. – Фрунзе, 1986. – 104 с.
81. Разработка, изготовление и эффективность ИИС СТАРТ: Отчет /ФПИ; Руководитель работы П.И. Пахомов. – № ГР 01850018576; Инв. № 02860033337. – Фрунзе, 1985. – 90 с.
82. Разработка, исследование и внедрение многофункциональной индуктивной аппаратуры КОНТУР с датчиками контроля безопасности: Отчет /ФПИ; Руководитель работы П.И. Пахомов. – № ГР 79011561; Инв.№ 02850026744. – Фрунзе, 1984. – 240 с.
83. *Садовский Л.Е., Садовский А.Л.* Математика и спорт. – М.: Наука, 1985. – 192 с.
84. *Самородов А.И., Федоров Е.М.* Требования к предохранительному торможению подъемной установки //Безопасность труда в промышленности. – 1984. – № 4. – с.42-43.
85. Система нормативной документации по наладочно-ремонт-ным работам при техническом обслуживании средств автоматики и телемеханики мелиоративного назначения /В.Я. Карпенко, В.Н. Клепиков, В.А. Салтыков: ВНИИКАмелиорации. – Фрунзе, 1984. – 274 с.
86. Система СИГНАЛ-5. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ЗМ1.270.005 ТО:/Сев.-Кав. филиал ВНИКИцветметавтоматика. – Орджоникидзе, 1979. – 81 с.

87. Слежановский О.В., Бирюков А.В., Хуторецкий В.М. Устройства унифицированной блочной системы регулирования дискретного типа (УБСР-Д). – М.: Энергия, 1975. – 256 с.
88. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики. – М.: Наука, 1969. – 511 с.
89. Справочник по полупроводниковым диодам, транзисторам и интегральным микросхемам /Под общ. ред. Н.Н. Горюнова. – М.: Энергия, 1976. – 744 с.
90. Справочник по средствам автоматики /Под ред. В.Э. Низэ и И.В. Антика. – И.: Энергоатомиздат, 1983. – 503 с.
91. Степанов А.Г. Теоретические основы предохранительного торможения современных шахтных подъемных машин. Автореф. дисс. докт. техн. наук. – Пермь, 1974. – 38 с.
92. Стороженко М.А., Кирей А.Ф., Маслий А.К. Аппаратура контроля, сигнализации и связи для подъемных установок. – М.: Недра, 1983. – 64 с.
93. Стороженко М.А., Кирей А.Ф., Маслий А.К. Аппаратура управления и контроля рудничными подъемными установками. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1980. – 216 с.
94. Теория надежности радиоэлектронных систем в примерах и задачах /Г.В. Дружинин, С.В. Степанов, В.А. Шихматова и др.; Под ред. Г.В. Дружинина. – М.: Энергия, 1976. – 448 с.
95. Толпежников Л.И. Автоматическое управление процессами шахт и рудников. – М.: Недра, 1985. – 352 с.
96. Траубе Е.С. Наладка и эксплуатация защит шахтных подъемных установок. – М., 1969.
97. Улинич Р.В. Практическое обеспечение надежности РЭА при проектировании. – М.: Радио и связь, 1985. – 112 с.
98. Файнштейн В.Г., Файнштейн Э.Г. Микропроцессорные системы управления тиристорными электроприводами /Под ред. О.В. Слежановского. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 240 с.
99. Флоринский Ф.В. Динамика шахтного подъемного каната. – М.: Углетехиздат, 1955.
100. Фролов Г.И., Гембицкий Р.А. Микропроцессоры. Автоматизированные системы контроля объектов /Под ред. Л.Н. Преснухина. – М.: Высш. шк., 1984. – 87 с.
101. Чермалых В.М., Родькин Д.И., Каневский В.В. Системы электропривода и автоматики рудничных стационарных машин и установок. – М.: Недра, 1976. – 398 с.
102. Шапочка Н.В. Исследование и разработка средств отбора путевой дискретной информации для аппаратов управления и защиты шахтных подъемных установок: Автореф. дисс. канд. техн. наук. – Тбилиси, 1975. – 18 с.
103. Шапочка Н.В., Ашкалуни В.Л., Подошев Э.Л. Комплект аппаратуры управления и защиты подъемных машин на элементах «Логики-И» //Вопросы разработки шахтных стационарных установок: Сб. науч. тр. /ВНИИГМ им. М.М. Федорова. – Донецк, 1982. – с.164-173.
104. Шварц Б.А. Двухсторонняя индуктивная связь внутри предприятия. – М.: Связь, 1972. – 156 с.
105. Шварц Б.А. К расчету индуктивной связи с малогабаритным носимым передатчиком: Сб. науч. тр. ин-та связи. – Л., 1968, вып.38, с.80-85.
106. Экономическая эффективность новой техники и технологии в машиностроении / Под ред. К.М.Великанова. – Л.: Машиностроение, 1981. – 255 с.
107. Duroff S. Moderne Leistso Ilwertgeber für För dermaschinen. Technische Mitteilungen AEG-Telef. – 1981. – № 1-2. – s.43-49.
108. Eiji Stakura et al. Method for the continuaus detektian of vehiele position. USA/ Patent. № 3 877.666. apr.15. 1975.
109. Leuris D.C. Ormandroyd H.Cade Pasition monitop using Magnetie striping. Mining Technology. – 1980. – № 716. – p.267-271.