

Федеральное государственное бюджетное учреждение  
высшего образования  
«Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления»

*На правах рукописи*



ГАРМАЕВ АЛЕКСЕЙ ЛЕОНИДОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОБИЛЬНЫХ  
МАШИН НА ОСНОВЕ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА**

Специальность 05.26.01 – «Охрана труда (электроэнергетика)»

**Диссертация**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель –  
доктор технических наук,  
доцент **Т.В. Еремина**

Улан-Удэ – 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>4</b>
<b>1 ОБОБЩЕННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ РЕСПУБЛИКИ БУРЯТИЯ.....</b>	<b>9</b>
1.1 Структурный анализ электроустановок (на примере электрических мобильных машин – ЭММ), применяемых в производственных процессах предприятий электроэнергетики .....	9
1.2 Статистическое исследование электротравматизма и его инструментальный анализ .....	19
1.3 Систематизация факторов, определяющих условия работы ЭММ .....	32
1.4 Задачи исследования.....	52
<b>2 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОБИЛЬНЫХ МАШИН.....</b>	<b>54</b>
2.1 Частотный метод анализа признаков электротравматизма .....	54
2.2 Математический аппарат оценки влияния факторов, определяющих условия работы с электрическими мобильными машинами .....	62
2.3 Анализ показателей техногенной опасности возникновения электротравмирования при эксплуатации ЭММ .....	72
2.4 Сценарное прогнозирование и его оценка развития электротравматизма. ...	81
2.5 Выводы.....	87
<b>3 АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ ЭММ.....</b>	<b>89</b>
3.1 Подобно-критериальное моделирование системы безопасности электрических мобильных машин.....	89

3.2 Моделирование формализованного процесса возникновения элеутроопасных ситуаций в системе обеспечения безопасности .....	97
3.3 Оценка уровня электробезопасности электрических мобильных машин....	104
3.4 Принципы программно-целевого управления обеспечением безопасности	108
3.5 Выводы .....	119
<b>4 МЕХАНИЗМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОГЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ</b>	
<b>ЭММ.....</b>	<b>121</b>
4.1 Методы совершенствования безопасной работы ЭММ.....	121
4.2 Разработка устройства защитного отключения (УЗО-адаптер).....	132
4.3 Социальная и экономическая эффективность применения средств электрозащиты ЭММ.....	140
4.4 Выводы .....	148
<b>ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....</b>	<b>149</b>
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....</b>	<b>151</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А.....</b>	<b>166</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....</b>	<b>172</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В.....</b>	<b>176</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г .....</b>	<b>178</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....</b>	<b>180</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....</b>	<b>181</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.....</b>	<b>183</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ И.....</b>	<b>184</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ К.....</b>	<b>186</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Развитие рыночной экономики в современных условиях характеризуется внедрением новых технологий, механизацией и автоматизацией производственных процессов. Следует отметить, что среди многочисленного арсенала разнообразных установок, аппаратуры, используемых в сфере производства, широкое распространение получили электрические мобильные машины (ЭММ), нашедшие применение практически во всех отраслях деятельности человека. Их внедрение способствует существенному облегчению условий труда и повышению его производительности.

ЭММ повсеместно используются как во всех отраслях экономики, так и в домашнем хозяйстве. Из-за широкого спектра применения к ним предъявляются высокие требования безопасности.

Несомненно, из всего разнообразия ЭММ наибольшее применение получили ручные электрические машины ударного и ударно-вращательного действия. Они универсальны, портативны и могут использоваться в разнообразных технологических операциях, в том числе при обработке труднодоступных мест. Тенденция развития такова, что внедрение ЭММ в промышленность, равно как, и на объектах электроэнергетики будет сохраняться.

Все это предъявляет повышенные требования к системе безопасности при эксплуатации ЭММ, приводит к необходимости совершенствования существующих технических и организационных мероприятий, внедрения высокоэффективных защитных средств.

В связи с этим, необходимо дальнейшее развитие исследований с расширением круга практических задач по вопросам оценки влияния факторов системы «человек – ЭММ – проводимая операция – окружающая среда» («Ч-ЭММ-ПО-ОС») на безопасность данных машин, что является актуальной

научно-технической задачей повышения безопасности, принятой для решения в данном исследовании.

**Гипотеза.** Техногенная безопасность ЭММ может быть обеспечена путем комплексного анализа системы безопасности при установлении взаимосвязи между ее компонентами.

**Целью работы** является разработка оптимальной системы безопасности ЭММ на основе научных и инженерных методов расчета критериев безопасности, способствующих созданию эффективных защитных средств, обеспечивающих требуемый уровень безопасности функционирования системы на объектах электроэнергетики.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Проанализировать состояние условий безопасности ЭММ и выполнить систематизацию признаков-факторов человеко-машинной системы, установив их причинно-следственные связи;

2. Провести моделирование комплекса признаков, факторов, характеризующих особенности эксплуатации ЭММ и построить обобщенную математическую модель создания перспективной системы безопасности мобильных машин;

3. Обосновать метод оптимизации основных критериев безопасности человеко-машинной системы и принципы управления безопасностью;

4. Разработать технические средства повышения безопасности ЭММ и определить социально-экономическую эффективность их внедрения.

**Объект исследования** - ЭММ производственных помещений и территорий предприятий электроэнергетики.

**Предмет исследования** - установление закономерностей, характеризующих изменение состояния человеко-машинной системы при воздействии неблагоприятных факторов, позволяющих обосновать методы повышения безопасности ЭММ.

**Научная новизна работы:**

1. Разработаны математические методы анализа безопасной эксплуатации ЭММ, позволяющие прогнозировать уровень безопасности;
2. Разработан метод математического моделирования системы безопасности ЭММ на основе многокритериального анализа;
3. Разработан и обоснован метод оптимизации процесса, обеспечивающего эффективную систему безопасности ЭММ;
4. Разработана и обоснована структурная модель способов обеспечения техногенной безопасности ЭММ.

**Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Разработаны методы оценки статистических данных и функциональных связей комплекса признаков-факторов, определяющих состояние безопасности человеко-машинной системы;
2. Сформирован принцип построения комплекса программно-целевого управления безопасностью ЭММ;
3. Разработан метод оценки показателей и критериев значимых факторов системы безопасности ЭММ;
4. Разработано новое техническое средство защиты ЭММ, позволяющее предотвращать случаи возникновения электротравматизма среди операторов ЭММ.

**Методология и методы исследования.** Системный анализ, теория вероятностей, математическая статистика, методы математического моделирования, регрессионный анализ, методы оптимизации систем.

**На защиту выносятся:**

1. Концепция вероятностного анализа условий безопасности ЭММ, основанная на системном подходе, применении математических, статистических, натурных методов, характеризующая причинно-следственные взаимодействия в человеко-машинной системе.
2. Структурная модель системы «Ч-ЭММ-ПО-ОС», позволяющая определить показатель степени значимости опасных факторов, анализировать

воздействие опасных ситуаций, оказывающих влияние на состояние техногенной безопасности ЭММ.

3. Математическая модель оптимизации системы безопасности с использованием критериев подобия важнейших факторов подсистем «человек», «ЭММ», «проводимая операция», «окружающая среда».

4. Результаты практических способов совершенствования комплексной безопасности ЭММ.

#### **Степень достоверности и апробация результатов исследования.**

Достоверность полученных результатов подтверждается представленным объемом исходных данных по производственному электротравматизму и условиям использования ЭММ на объектах электроэнергетики Республики Бурятия; удовлетворительной оценкой сравнения теоретических исследований с результатами экспериментальных исследований.

Основные результаты работы и практические рекомендации используются на предприятиях электроэнергетики Республики Бурятия при эксплуатации ЭММ, а также применяются в учебном процессе при подготовке специалистов по направлению «Электроэнергетика и электротехника». Основные материалы и результаты работы представлялись и обсуждались на ежегодных научно-практических конференциях аспирантов и профессорско-преподавательского состава Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления (Улан-Удэ, 2012-2016гг.), на VIII Международной заочной научно-практической конференции «Научная дискуссия: вопросы технических наук» (Москва, 2013г.), на II Международной заочной конференции «Проблемы техносферной безопасности» (Барнаул, 2016г.), на Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика Байкальского региона: проблемы и перспективы» (Улан-Удэ, 2016г.), на Республиканской научно-практической конференции «Электроэнергетика, гидроэнергетика, надежность и безопасность» (Душанбе, 2016).

**Личный вклад автора** состоит в постановке задач исследования, в доказательстве научных положений, разработке моделей системы безопасности ЭММ, моделей травмоопасных ситуаций, создании защитных средств.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Научные положения, приведенные в диссертации, соответствуют области исследований специальности 05.26.01 – Охрана труда (электроэнергетика), в частности, п.3 «Разработка методов контроля, оценки и нормирования опасных и вредных факторов производства, способов и средств защиты от них».

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы опубликованы автором в 13 печатных работах, в том числе в 4 статьях рецензируемых изданий, входящих в перечень ВАК, в 2 патентах на полезные модели.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов, библиографического списка, включающего 165 наименований и 9 приложений. Содержит 150 страниц основного текста, в том числе 33 рисунка и 27 таблиц.



# **1 ОБОБЩЕННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ РЕСПУБЛИКИ БУРЯТИЯ**

## **1.1 Структурный анализ электроустановок (на примере электрических мобильных машин – ЭММ), применяемых в производственных процессах предприятий электроэнергетики**

Рост потребления электроэнергии – одна из основных тенденций развития мировой экономики в соответствии с прогнозом Международного энергетического агентства, к 2025 году потребление электроэнергии в мире вырастет до 26 трлн.кВтч по сравнению с 14,8 трлн.кВтч в 2003 году. При этом установленная мощность электростанций вырастет с 3400 ГВт в 2003 году до 5500 ГВт в 2025 году [1].

В России потребление электроэнергии после затяжного спада 1990-1998 гг. неуклонно растет и в 2015 году, по прогнозам МЭРТ, превысило уровень 1993 года. «Энергетической стратегией России на период до 2020 года» прогнозировался прирост потребления электроэнергии в 2000-2005 гг. в 46-50 млрд.кВтч, однако реальный прирост оказался выше более чем в 1,5 раза и составил 73 млрд.кВтч [2].

В свою очередь, развитие электроэнергетики, увеличение парка используемых электроустановок, электрической аппаратуры и других, таит в себе потенциальную опасность для людей и среды обитания. Анализ техногенных угроз на промышленных объектах показал, что более 30% аварий, пожаров и электротравм происходит из-за изношенности электрических сетей, 40% – из-за несовершенства нормативно-правовой базы и несоблюдения правил по охране труда и технике безопасности, а также недостаточно квалифицированного обслуживания электроустановок и приборов персоналом [3].

Возникшие в последние годы качественные преобразования в сфере электрификации производственных процессов на объектах экономики позволяют решить ряд важнейших социально-экономических задач: улучшить условия труда и повысить его производительность, создать безопасные и безвредные условия эксплуатации технического и электрического оборудования, электроустановок.

Начиная с 60-х годов, в нашей стране проводятся комплексные исследования в области теории и практики электробезопасности [4, 5]. Сюда следует отнести формирование вероятностной концепции о природе электротравматизма [6, 7], разработку теории оптимизации системы безопасности [8, 9], изучение механизма воздействия электрического тока на живой организм и разработку предельно допустимых уровней напряжений прикосновения и токов [10, 11], разработку теории инженерных методов расчета заземляющих устройств (включая устройств для выравнивания электрических потенциалов – УВЭП) [12, 13], создание и внедрение эффективных средств электрозащиты – устройств защитного отключения [14, 15, 16, 17]. Все это не могло не сказаться на показателях уровня электробезопасности. Исходя из анализа статистических исследований, в которых отмечается, что за период с 1960г. по 1980г. производственный электротравматизм снизился на 10%, однако снижение непромышленного электротравматизма было незначительным – не более 3% [18]. Имея незначительное снижение непромышленный электротравматизм составлял около 40% всех расследованных несчастных случаев. После 80-х годов электротравматизм в России стал возрастать и к 2005 году увеличился почти в 3 раза [19]. За последние 10-15 лет в связи с подъемом экономики стали широко применяться современные высокоэффективные установки в промышленности и других объектах страны, что существенно отразилось на безопасности производства [20].

Развитие рыночной экономики в современных условиях характеризуется внедрением новых технологий, механизацией и автоматизацией производственных процессов. Следует отметить, что широкое распространение получили электрические мобильные машины(ЭММ), среди которых 60-70% составляют ручные электрические машины или электроинструмент, используемые практически во всех отраслях деятельности человека [21].

Повышение уровня механизации непосредственно связано с увеличением объемов выпускаемой продукции электротехнической промышленностью, которая ежегодно выпускает до 150-180 млн. различных электроприборов, электроустановок. С учетом зарубежных установок, парк электротехники, применяемой в промышленности, сельском хозяйстве и бытовых условиях в

настоящее время превысил 2,5 млрд. единиц [22]. ЭММ повсеместно используются в различных производствах, в т.ч. на объектах электроэнергетики. Данные изделия имеют широкий спектр применения, вследствие чего к ним предъявляются высокие требования безопасности [23, 24].

В Федеральной программе по улучшению условий безопасности труда на 2011-2015 гг. записано: «Критическое положение с безопасностью труда обусловлено низким уровнем технической оснащенности многих производств, применением устаревших технологий, изношенностью машин, механизмов, оборудования, недостаточным обеспечением и отсутствием инженерных решений по разработке средств защиты работающих, а также низкой эффективностью средств индивидуальной и коллективной защиты» [25].

Не решенные на протяжении многих лет задачи улучшения условий труда и безопасности операторов мобильных машин приводят к дальнейшему росту травматизма и заболеваемости этой категории работников [26]. В связи с этим необходимо отметить, что применение ЭММ связано с воздействием на человека опасных и вредных факторов. Поэтому, безопасность ЭММ будет определяться не только состоянием электробезопасности, но и условиями воздействующих неблагоприятных факторов. Опасные и вредные факторы, как отмечено в [27] при работе с ЭММ оказывают негативное влияние на возникновение электротравматизма. Анализ использования мобильной электротехники показал, что 90% мобильных машин являются виброопасными. В связи с этим, по мере роста интенсивности работы мобильных машин, возросли уровни передаваемой вибрации на руки операторов [28].

Возникающие несчастные случаи являются частью негативных последствий эксплуатации ЭММ, вызванных с одной стороны, неполным устранением опасных и вредных факторов, с другой стороны, отсутствием единого подхода к рассмотрению процесса работы ЭММ как сложной социально-технической системы, при рассмотрении которой необходимо учитывать взаимосвязи между элементами системы, выявлять роль каждого из них в общем процессе

функционирования, учитывать комплексное воздействие экономических, социальных, технических и психологических факторов [29].

Известно, что основными факторами, влияющими на тяжесть поражения электрическим током, являются условия получения электротравмы, индивидуальные особенности организма человека, т.е. его физическое и особенно психическое состояние. При работе с ЭММ в результате воздействия опасных и вредных факторов на оператора происходит нарушение психических процессов, а именно, сужение внимания, сопровождающееся замедленностью в принятии решения и нарушением способности оценки ситуации [30, 31].

Важнейшим элементом дальнейшего развития объектов экономики страны является создание благоприятных условий для непрерывного повышения эффективности трудового процесса. Эффективность трудового процесса означает совокупность факторов производственной среды, оказывающих влияние на здоровье и работоспособность людей, занимающихся трудовой деятельностью. Как отмечено в [20], электричество относится к весьма опасным, неспецифическим факторам производственной среды в условиях современного развития электрификации промышленности, широкого применения большого разнообразия электроустановок, является причиной значительного травматизма людей, а именно – электротравматизма. При этом важное социальное значение приобрело перспективное развитие разработки, выпуска широкого внедрения средств электрозащиты, предотвращающих возникновение электротравматизма при эксплуатации электроустановок [32].

Быстрое развитие электрификации нашей страны определяется наметившимся с 2000 г. ростом электропотребления и увеличением темпов подъема промышленности и сельского хозяйства и превращением отраслей экономики в высокомеханизированное производство [33, 34]. На рисунке 1.1 приведена динамика производства электроэнергии в стране за период окончания прошлого тысячелетия и начала XXI века, отмечено развитие электроэнергетики в Байкальском регионе, в состав которого входят Республика Бурятия, Иркутская область и Забайкальский край [35].

Перспективы увеличения объемов электропотребления связаны с развитием и расширением производственных процессов. Наряду с развитием электрификации должна совершенствоваться и система электробезопасности. Структура электробезопасности такова, что она обеспечивает безопасность не только людей, но и техногенную безопасность, и в этом проявляется своеобразие мероприятий по обеспечению электрозащиты в условиях производства.

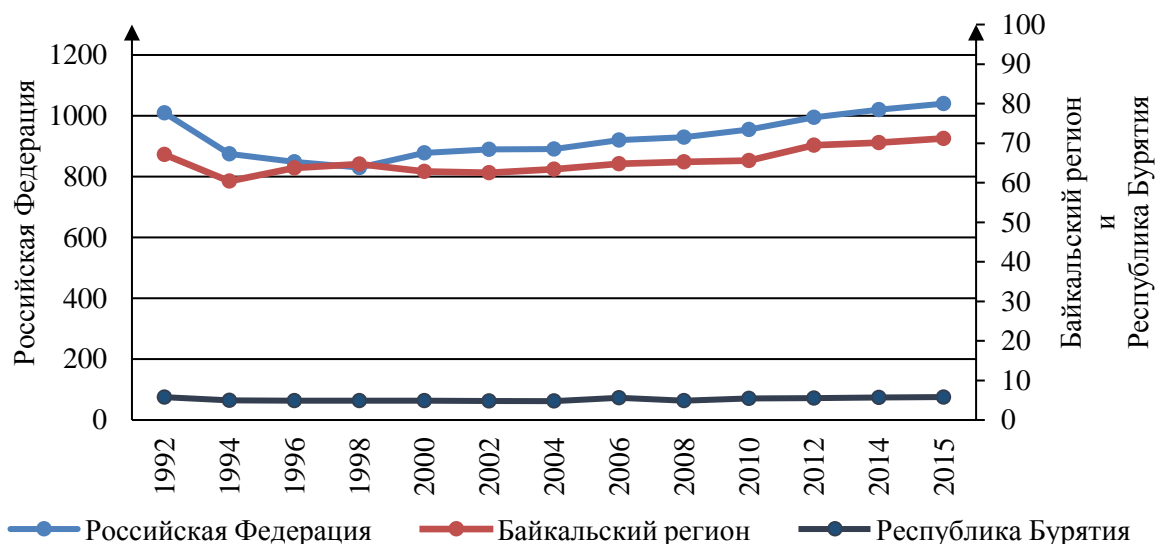


Рисунок 1.1 – Динамика производства электроэнергии в России в 1992 – 2015 годах, в млрд. кВтч.

Одним из показателей уровня электрификации является степень оснащённости электроустановками, электроприборами, используемыми в производстве, в частности на предприятиях электроэнергетики.

В настоящее время в стране созданы необходимые условия, социально-экономические предпосылки развития электрификации и интенсификации производственных процессов при широком внедрении разнообразных видов стационарных и нестационарных электроустановок, т.е. электрических мобильных машин [36].

По результатам анализа электропотребления и статистическим данным по использованию ЭММ [37], необходимо отметить увеличение парка передвижных и переносных машин и механизмов, а также ручного электроинструмента, применяемых в производственных условиях на объектах электроэнергетики.

По экспертным оценкам приоритетными видами механизации труда являются электрические мобильные машины. Потребность в ЭММ возрастает как в промышленности, в сельском хозяйстве, так и в бытовых условиях.

Электрические мобильны машины относятся к средствам малой механизации, они портативны, повышают производительность труда в 4-10 раз в сравнении с ручным трудом, т.е. использование их дает возможность механизировать любую выполняемую работу [24]. Поэтому внедрение ЭММ на предприятиях электроэнергетики и других объектах будет сохраняться, к тому же они сравнительно недороги в изготовлении и несложны в эксплуатации.

В зависимости от технологических операций используется определенный тип машин. В связи с этим при решении проблемы безопасной эксплуатации номенклатурный перечень мобильных машин, а именно, средств малой механизации классифицируется, причем по самым разнообразным признакам. Для этого требуется определить какого рода опасные и вредные производственные факторы оказывают влияние на применение данной техники. Как указано в [36,38], вопросы безопасности могут быть наилучшим образом выявлены и сформулированы при следующей классификации:

- по специфике объекта видоизменения и характеру воздействия на него;
- по виду технологической операции, реализующей воздействие;
- по разновидности встроенного двигателя;
- по конструктивному исполнению привода, как связующего звена, в кинетической цепочке: рабочий орган, привод, двигатель.

В рамках первой классификации ожидается видоизменение объекта в процессе воздействия на него рабочего органа мобильной машины и проявления факторов окружающей среды в соответствии с приведенной в [39] структурой.

Вторая классификация характеризуется видами технологических операций и используемыми рабочими органами, по которым именуют ту или иную мобильную машину, например: сверлильная машина, сварочный аппарат, молоток и др. Перечень этих машин, выпускаемых промышленностью, составляет основу их классификации. Безопасность в пределах данной классификации определяется

необходимостью контроля физических опасных и вредных производственных факторов [39] среди которых выделены следующие:

- подвижные части производственного оборудования;
- повышенный уровень шума на рабочем месте;
- повышенный уровень вибрации;
- повышенный уровень ультразвука;
- острые кромки и шероховатость на поверхности рабочих органов.

Благодаря наличию встроенного двигателя появилась формулировка – мобильная машина. Виды встроенных двигателей, являющиеся третьей классификацией, приведены на рисунке 1.2.

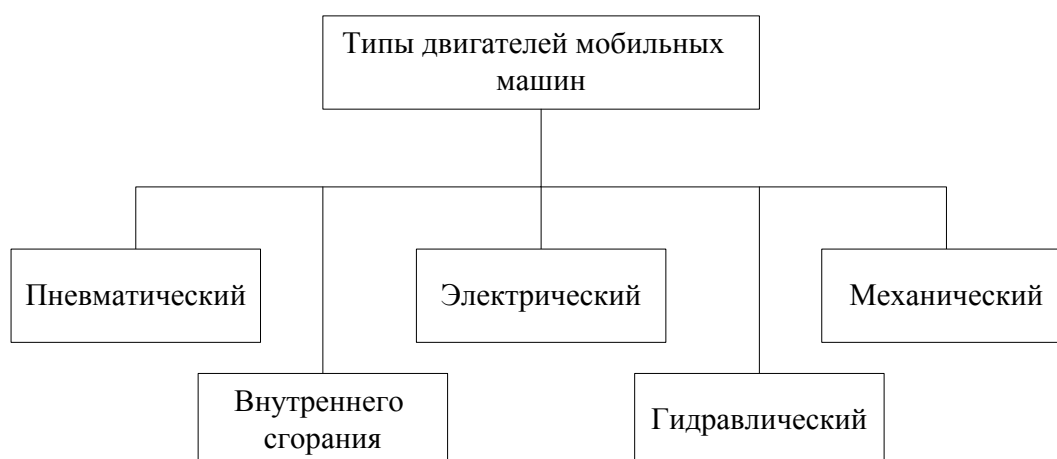


Рисунок 1.2 – Классификация мобильных машин по типу встроенных двигателей

Из указанных двигателей наибольшее применение имеют электрические двигатели. Поэтому электрические мобильные машины, т.е. (ЭММ) используются практически везде, где есть доступ к источнику электроэнергии, и к тому же имеют более высокую производительность в сравнении, допустим с пневматическими мобильными машинами, которые, однако имеют широкое применение в различных отраслях промышленности, как наиболее безопасные и простые в эксплуатации [24].

Безопасность выполняемых работ определяется спецификой встроенного двигателя и представляет сложный комплекс факторов. Основные проблемы безопасности зависят от конкретного вида двигателя. В частности,

электродвигатели представляют опасность замыкания тока через тело человека; пневмодвигатели характеризуются повышенным воздушным давлением в пневмосети и другие двигатели представляют определенный вид опасности. Кроме того, практически все двигатели являются источниками повышенного уровня шума и вибрации.

Четвертая классификация представляет кинетическую составляющую, т.е. привод, обеспечивающую передачу механической энергии от встроенного двигателя к рабочему органу. Классификация и конструктивное исполнение мобильной машины связано напрямую с типом привода. Применяемые типы передвижных и переносных машин, а также ручного инструмента могут быть контактного, ударного и ударно-вращательного действия а также ударного и ударно-поворотного действия [36].

Безопасность работы мобильной машины находится в непосредственной зависимости от исполнения привода и определяется следующими уровнями [23]:

- способом фиксации рабочего органа;
- блокировкой, гарантирующей безопасность оператора;
- экранированием рабочей зоны.

Таким образом, надежность выполнения требуемых функций и регулировка режимов работы, в соответствии с эргономическими характеристиками, является характерной особенностью конструкции привода.

Ввиду того, что человек находится в постоянном контакте с мобильной машиной в период ее эксплуатации, поэтому, кроме приведенных в [39] опасных и вредных факторов могут возникать неучтенные или выходящие за рамки основных, факторы риска возникновения травматизма.

Если проводить грань сравнения мобильных машин по степени опасности травмирования, то наибольшую опасность представляют машины с электроприводом, ввиду того, что при аварийном режиме, т.е. при возникновении травмоопасной ситуации, человек может получить не только механическую травму, но и более опасную – электрическую травму.



В таблице 1.1 приведен перечень наиболее характерных видов работ на предприятиях электроэнергетики с применением ЭММ и типы машин.

Таблица 1.1 – Классификация электрических мобильных машин по видам выполняемых работ

№ п/п	Технологический процесс, выполняемые работы	Тип ЭММ
<u>а) Производственные объекты</u>		
1	Строительные и ремонтно-строительные работы: - разрушение кирпичных и бетонных фундаментов; - рыхление твердого и мерзлого грунта; - пробивка борозд, ниш и отверстий в кирпичной кладке, бетоне; - отделочные работы и др.	Сверлильная, шлифовальная, перфоратор, дрель, рубанок, молоток, бетоносмесители: отбойный молоток с патроном SDS-max Bosch GSH 11 VC Professional, P <sub>н</sub> =1700Вт, штроборез ЗУБР ЗШ-1500, P <sub>н</sub> =1500Вт, рубанок MAKITA 1911B P <sub>н</sub> =900Вт, герметизатор ИЭ-6602, P <sub>н</sub> =1150Вт, перфоратор Bosch PBN 2900 RE, P <sub>н</sub> =730 Вт, эксцентриковая шлифмашина Bosch GEX 150 AC Professional P <sub>н</sub> =340Вт, бетоносмеситель 240л, P <sub>н</sub> =800Вт
2	Электромонтажные работы: - сверление отверстий; - резка металлических конструкций, проводов; - резбонарезные и резбозавертывающие операции; - пробивка борозд, отверстий и др.	Сверлильная, шлифовальная, ножницы, гайковерт, шуруповерт: дрель ударная Bosch PSB 680, P <sub>н</sub> =680Вт, дрель-шуруповерт Интерскол Ш-8/700ЭР, P <sub>н</sub> =700Вт, углошлифовальная машина Metabo WX 2000, P <sub>н</sub> =2000Вт, вырубные ножницы Bosch GNA 16 (SDS) Professional, P <sub>н</sub> =340Вт
3	Обработка металлоконструкций: - противокоррозионная очистка для лакокрасочных покрытий; - резка труб и листового профильного металла; - сварные работы; - зачистка поверхностей, сварных швов; - полировка металлических и строительных изделий и др.	Сверлильная, шлифовальная, ножницы, сварочный аппарат: аппарат сварочный многофункциональный Plasma 33 Multi, I=125А, P <sub>н</sub> =3500Вт
4	Механические работы в производственных помещениях и на территории	Сверлильная, шлифовальная, перфоратор, дрель, шуруповерт, молоток

## Продолжение таблицы 1.1

5	Обработка древесины и др.	Пила цепная, пила дисковая рубанок, сверлильная, шлифовальная: пила электрическая цепная Sterwins 2200CS ILM-2, P <sub>H</sub> =2200Вт, пила циркулярная Hilti SC 55W, P <sub>H</sub> =1200Вт
	<u>б) Вспомогательные объекты</u>	
6	Строительные и ремонтно-строительные работы	Сверлильная, шлифовальная, перфоратор, дрель, рубанок
7	Прочие	Лобзик Metabo Quick STEB 70, P <sub>H</sub> =570Вт

Таким образом, каждая ЭММ предназначена для выполнения конкретных видов работ и эксплуатации в конкретных производственных условиях.

Исходя из того, что при эксплуатации эти машины могут представлять потенциальную опасность поражения электрическим током, в некоторых случаях приводя к летальному исходу, поэтому требуется пристальное внимание к решению вопросов электробезопасности. Обеспечение защиты оператора ЭММ от поражения электрическим током является серьезной проблемой. К ЭММ предъявляются более жесткие требования электробезопасности, чем к стационарным электроустановкам, поскольку первые находятся в менее благоприятных условиях эксплуатации, чем вторые [40]. ЭММ могут эксплуатироваться как квалифицированным персоналом, так и лицами, не имеющими специальной подготовки, а сами машины могут применяться в различных условиях окружающей среды, подвергаться перегрузкам и механическим повреждениям.

Решение вопросов электробезопасности связано с соблюдением требований нормативных характеристик допустимых уровней напряжения прикосновения и токов, протекающих по телу человека, с учетом классификации ЭММ (I, II, III) и с соответствующим выбором типа защиты от поражения электрическим током [41, 42].

Обеспечение электробезопасности приобретает особое значение в решении наиболее важных вопросов безопасности эксплуатации электрических мобильных машин.

Автором были проведены исследования условий применения ЭММ на электроэнергетических объектах Республики Бурятия, таких как АО «Улан-Удэ Энерго», филиала ПАО «МРСК Сибири»-«Бурятэнерго», в частности, уровень развития применения электрических мобильных машин и условия обеспечения безопасности работы с данными машинами.

В настоящее время, в связи с ростом производительности труда, увеличением разнообразия выполняемых операций с помощью средств малой механизации, электрические мобильные машины в большей степени стали представлять потенциальную опасность возникновения электротравматизма человека, т.к. уровень безопасности машин недостаточен. Специфика эксплуатации электрических мобильных машин свидетельствует о необходимости комплексного, системного подхода к решению вопросов безопасности на основе совершенствования организационных и технических мероприятий и анализе факторов, оказывающих негативное воздействие на формирование процесса обеспечения устойчивого развития применения мобильных машин, для расширения их производства и внедрения на объектах электроэнергетики.

Создание системы безопасности ЭММ, при выполнении конкретных технологических операций также зависит от состояния окружающей среды и от самого человека, т.е. возникает сложная комплексная проблема безопасности в человеко-машинной системе.

## **1.2 Статистическое исследование электротравматизма и его инструментальный анализ**

В общем комплексе мер по предупреждению и ликвидации травматизма весьма важное место занимает анализ статистических данных по электропоражениям с целью выявления и установления основных факторов и причин возникновения несчастных случаев.

Известно [43], что систематический анализ электротравматизма на производстве и т.д. проводится с 50-х годов, в течение которых накоплен

достаточно большой статистический материал по профилактике производственного электротравматизма. Позднее начали заниматься анализом бытового электротравматизма, имеющего специфические особенности, в частности, в 1978 году во ВНИИ охраны труда ВЦСПС были разработаны Методические указания по расследованию и учету несчастных случаев, не связанных с производством [44]. Поэтому, как отмечают сами авторы [44], учет и анализ причин непроизводственного электротравматизма даже с летальным исходом выполняется не полностью, а легкие несчастные случаи вообще не регистрируются. Однако, несмотря на это, как отмечается в [45], электротравматизм на производстве составлял в середине 70-х годов уже 34,02%.

Известно, что электроустановки потенциально опасны и невыполнение требований безопасности при их эксплуатации может привести к экстремальной ситуации: несчастному случаю, аварии. В 2001 году, как указано в [19], в России на электроустановках, подконтрольных органам Госэнергонадзора было зарегистрировано 776 групповых, смертельных, тяжелых и легких несчастных случаев, в которых пострадало 856 человек. При этом в 65 групповых случаях было поражено 145 человек (57 смертельно, 38 тяжело, 50 легко).

Результаты анализа показывают, что больше всего групповых, тяжелых и смертельных несчастных случаев произошло на электроустановках промышленных потребителей из-за недостаточного уровня организационных и эксплуатационных характеристик.

Представляет интерес динамика электротравматизма в отраслях промышленности, в том числе на объектах электроэнергетики, а также в сельском хозяйстве Российской Федерации согласно статистическим данным [46], (см. рисунок 1.3).

Из анализа данных следует, что при росте потребления электроэнергии, связанной с расширением производства в отраслях промышленности и развитием технологических процессов, наблюдается тенденция повышения электротравматизма, в том числе на предприятиях электроэнергетики. Здесь следует учитывать специфические условия получения, передачи и использования

электроэнергии в производственных и вспомогательных помещениях, на территории и др. Однако при этом отметим, что количество несчастных случаев с летальным исходом на объектах электроэнергетики и приведенных выше, непрерывно растет, что свидетельствует о имеющихся общих признаках, основным из которых является недостаточная безопасность обслуживания электроустановок и отсутствие эффективных электротраважных средств.

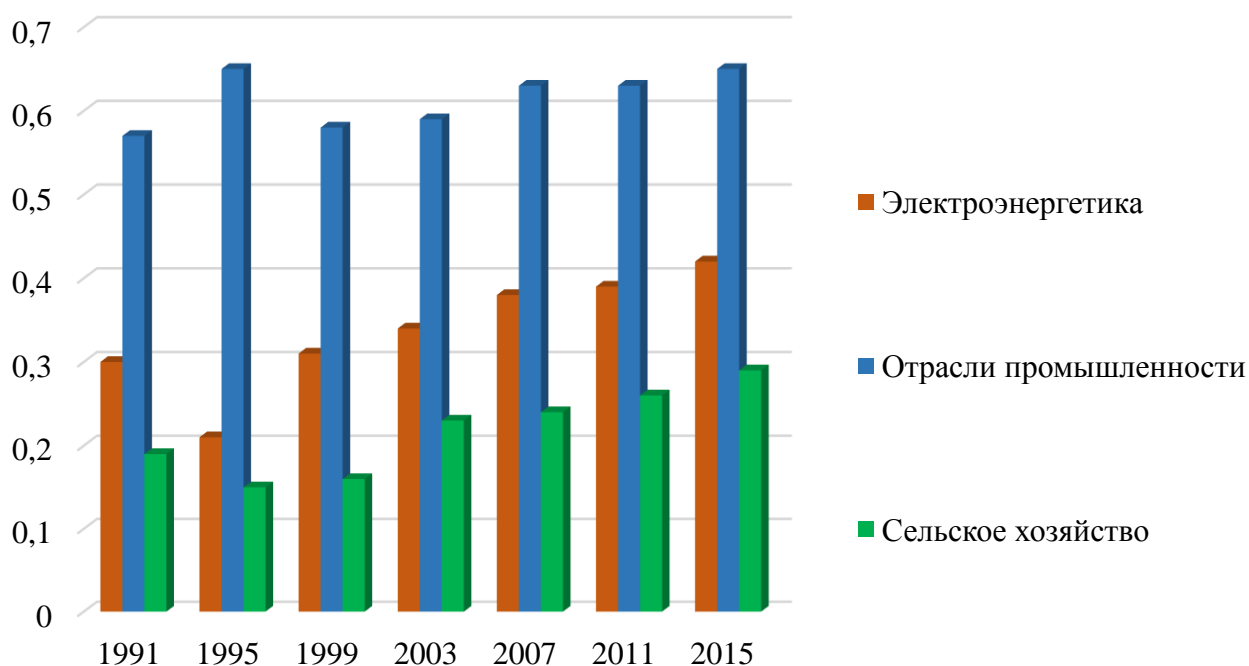


Рисунок 1.3 – Сравнительная оценка электротравматизма

Ниже приведены статистические данные по производственному электротравматизму со смертельным исходом за последнее десятилетие в Российской Федерации и для сравнения в зарубежных странах. На основании этих данных проанализированы причины возникновения несчастных случаев на производстве. Источниками статистических данных явились отечественные издания [46, 47, 48], зарубежные материалы [49, 50, 51], а также результаты массового обследования состояния электробезопасности на объектах электроэнергетики Республики Бурятия. В таблице 1.2 приведены данные по производственному электротравматизму со смертельным исходом в Российской Федерации и зарубежных странах.

Таблица 1.2 – Производственный электротравматизм (со смертельным исходом)

Страны	Годы наблюдения	Средняя (в год) доля электротравматизма в % от общего)
Россия	1999-2015	30,0
в том числе Республика Бурятия	1999-2015	33,1
Австрия	1999-2008	36,7
США	1997-2007	35,5
Германия	1996-2005	34,5
Великобритания	1996-2006	12,1

Статистические данные по электротравматизму со смертельным исходом за 2015 год [46] свидетельствуют о том, что к наиболее неблагоприятным отраслям относятся: строительство – 45%, смертельных электротравм от общего числа смертельных несчастных случаев, сельское хозяйство - 50% смертельных электротравм, весьма высоким продолжает оставаться электротравматизм в электроэнергетике – около 40% смертельных электротравм. В таблице 1.3 приведены статистические данные несчастных случаев происшедших в электроэнергетике, и для сравнения указаны данные в некоторых отраслях экономики страны [52].

Среди указанных отраслей наибольшее число несчастных случаев зарегистрировано в обрабатывающем производстве в 2015 году, также при производстве и распределении электроэнергии и в сельском хозяйстве. Отмечено некоторое возрастание электротравматизма во всех отраслях экономической деятельности, при скачкообразном изменении его.

Соотношение электротравм в зависимости от вида последствия, происшедших в российской энергетике за 10 лет (2006-2015гг.) приведено на рисунке 1.4 [35, 46, 47]. Анализ показывает высокий средний уровень смертельных электротравм, при этом в отдельные годы он достигает 60-70%.

Таблица 1.3 –Динамика несчастных случаев по видам экономической деятельности

№ п/п	Отрасль (подотрасль) экономики	Количество случаев, тыс.чел.						
		2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
1	Производство и распределение электроэнергии, газа, воды	12,9	13,0	12,6	12,4	12,1	12,2	13,1
2	Строительство	6,7	6,6	6,6	6,3	4,9	4,6	7,2
3	Обрабатывающие производства	25,9	27,1	26,6	23,8	17,0	18,7	28,4
4	Транспорт и связь	6,5	7,4	7,2	6,6	5,6	8,9	7,9
5	Сельское хозяйство	15,9	12,9	10,6	12,0	13,2	13,7	16,2
6	Добыча полезных ископаемых	4,9	4,2	3,9	3,3	2,7	2,8	4,9
7	Всего	72,8	71,2	67,5	64,4	55,5	60,9	77,7

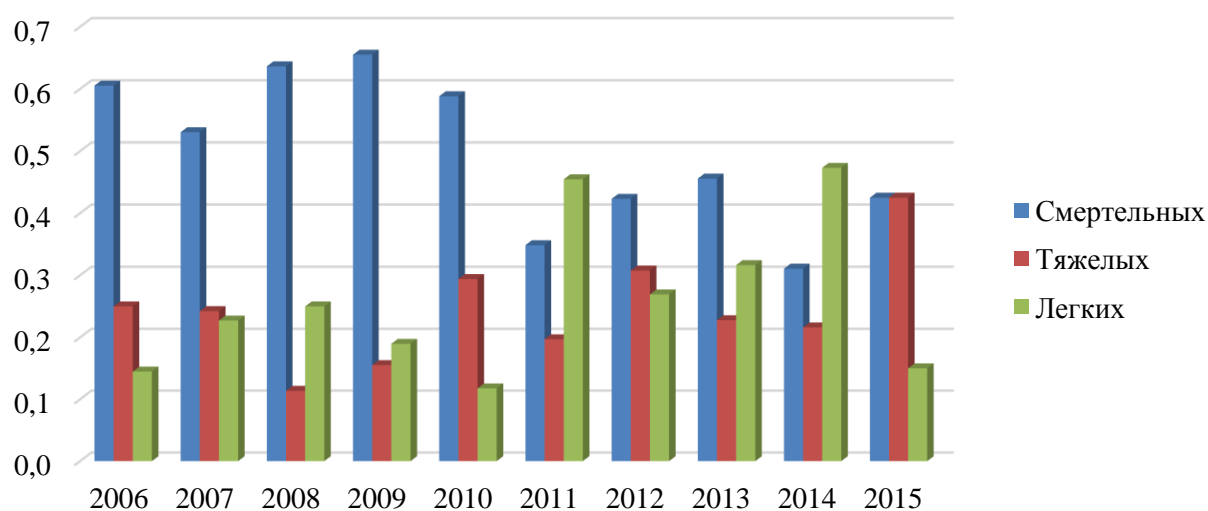


Рисунок 1.4. Динамика электротравм за период 2006-2015 годы

Анализ электротравматизма среди электротехнического персонала на предприятиях электроэнергетики показывает, что наибольшее количество несчастных случаев происходит с оперативно-ремонтным персоналом, занятым непосредственно ремонтом электрооборудования и производством переключений [19]. При выполнении работ на объектах электросетевого хозяйства чаще всего травмируется персонал имеющий IV группу по электробезопасности в электроустановках до и выше 1 кВ (см. таблицу 1.4) [19, 46].

Таблица 1.4 – Электротравматизм среди персонала по группам электробезопасности

№ п/п	Категории по направлению деятельности	В среднем за 10 лет (2006-2015) в %
	Персонал	
1	Административно-технический	3
2	Оперативный	5
3	Неэлектротехнический	28
4	Ремонтный	20
5	Оперативно-ремонтный	33
6	Электротехнический	11
	Группа электробезопасности	
1	1 группа	5
2	2 (до 1кВ)	7
3	2 (до и выше 1кВ)	3
4	3 (до 1кВ)	12
5	3 (до и выше 1кВ)	14
6	4 (до 1кВ)	17
7	4 (до и выше 1кВ)	23
8	5 (до и выше 1кВ)	5
9	Не присвоена	14

Как следует далее из рисунка 1.5 наибольшая величина электротравматизма, в процентном соотношении, при работе с ЭММ наблюдается на открытом воздухе, вне помещений. Причем, наблюдается возрастание показателя электропоражений в летний сезон, которое объясняется увеличением объема работ вне помещений, т.е. на территории электроэнергетических предприятий. Обстоятельства производства работ, в частности, с электроинструментом на открытой земле, в подвальных и подсобных помещениях представляются потенциально опасными, которые требуют повышенного внимания и использование специальных электрозащитных средств.



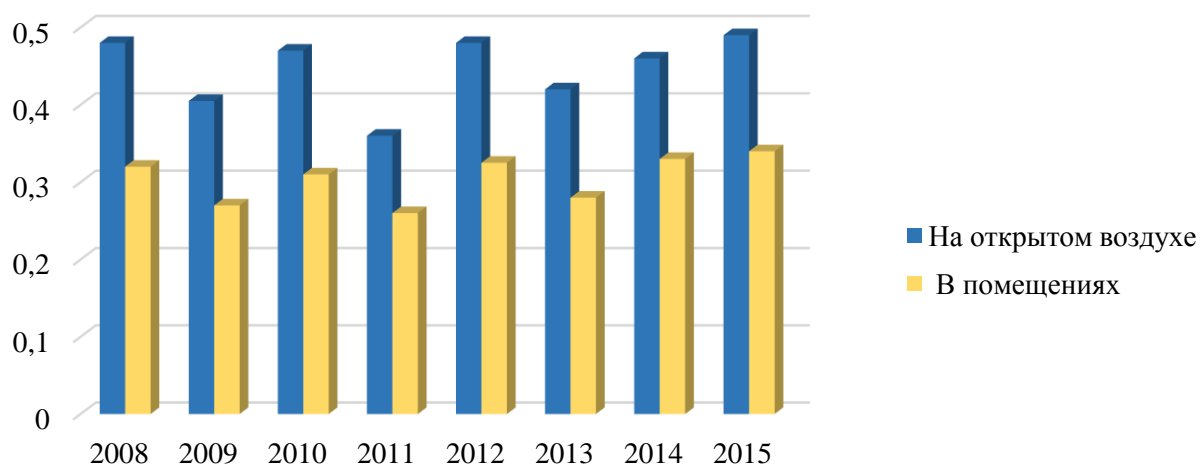


Рисунок 1.5 – Динамика электротравматизма в зависимости от места происшествия

Приведенная в таблице 1.5 классификация пострадавших по возрасту и в таблице 1.6 по стажу работы на электроэнергетических предприятиях Республики Бурятия позволяет определить наиболее чаще повторяющийся тип электротравмируемых, а именно, это лица в возрасте до 40 лет со стажем работы менее 10 лет. С одной стороны эта категория людей наиболее активно принимает участие в выполнении тех или иных видов работ, следовательно, чаще соприкасается с электроустановками, с другой стороны, являясь малоопытными или недостаточно обученными специалистами, имеет самые общие представления о правилах техники безопасности, а иногда и пренебрегая ими.

Таблица 1.5 – Классификация электротравматизма по возрасту пострадавших

№ признака	Социальный признак	В среднем за 10 лет (2006-2015г.г.) в %
Возрастная группа		
1	18-24 лет	32,5
2	25-39 лет	17,9
3	40-49 лет	31,1
4	50-59 лет	11,5
5	Свыше 60 лет	7,0
	Итого:	100

Таблица 1.6 – Классификация электротравматизма по стажу пострадавших

№ признака	Социальный признак	В среднем за 10 лет (2006-2015г.г.) в %
Длительность стажа		
6	5-10	18,8
7	до 1 года	27,4
8	1-5	28,6
9	10 и более	25,2
	Итого:	100

Из анализа электротравматизма по дням недели (таблица 1.7) установлено, что наибольшее число несчастных случаев при эксплуатации ЭММ происходит в понедельник и в пятницу, что связано с увеличением объема работ, неудовлетворительной организацией работ, нарушением техники безопасности.

Таблица 1.7 – Электротравматизм по дням недели на электроэнергетических объектах Республики Бурятия (% от общего числа электротравм за 2015 г.)

№ признака	Дни недели	Всего (%)	В т.ч. со смертельным исходом (%)
10	Понедельник	25,0	18,6
11	Вторник	15,2	9,5
12	Среда	10,2	5,8
13	Четверг	10,6	5,6
14	Пятница	16,0	9,9
15	Суббота	14,0	10,5
16	Воскресенье	9,0	6,5
	Итого:	100	66,4

В таблице 1.8 приведено распределение электротравматизма в зависимости от топографического расположения помещений и территорий и их классификации

по степени опасности электропоражения в соответствии с правилами [42]. Исходя из анализа следует, что 87,4 % несчастных случаев при эксплуатации ЭММ произошли в помещениях и на территории производственных объектов, относящихся к особо опасным и с повышенной опасностью.

Таблица 1.8 – Классификация электротравматизма по топографическим условиям

№ признака	Тип и наименование помещений (территорий)	В среднем за 10 лет (2006-2015г.г.) в %
I.	Особо опасные помещения	28,7
17	Производственные с температурой воздуха свыше 30°С	9,9
18	Производственные с содержанием токопроводящей пыли и металлическими полами	10,1
19	Помещения с наличием агрессивных сред	8,7
II.	Территории, относящиеся к 1 группе	20,8
20	Территории возле производственных помещений	9,6
21	Территории возле строящихся зданий, сооружений	11,2
III.	Помещения с повышенной опасностью	37,90
22	Механическое отделение	12,9
23	Столярное отделение	8,1
24	Электроремонтное отделение	7,7
25	Электрогазосварочное отделение	9,2
IV.	Помещения без повышенной опасности	8,2
26	Административные	3,8
27	Учебные классы	1,7
28	Актовые залы	1,3
29	Склады	1,4
30	V. Прочие	4,4
	Итого:	100

Таблица 1.9 и таблица 1.10 наглядно иллюстрируют наиболее опасные виды выполняемых работ с ЭММ на электроэнергетических объектах. Особую опасность представляет эксплуатация электромолотков (12,5%); электроперфораторов (10,6%); особенно часто электротравмы повторяются при работе с электродрелью (19,6%).

Таблица 1.9 – Классификация электротравматизма по видам работ с ЭММ

№ признака	Технологический процесс, выполняемая работа	В среднем за 10 лет (2006-2015г.г.) в %
31	Электромонтажные работы	8,5
32	Строительные работы	6,7
33	Ремонтно-строительные работы	19,4
34	Сварные работы	14,8
35	Специальные виды работ (производственные, обслуживание электросетевого хозяйства)	16,8
	Вспомогательные работы	
36	а - в строительстве	9,9
37	б - в производстве	7,3
38	в –в обслуживании	6,3
39	Санитарно-технические работы	5,8
40	Прочие	4,5
	Итого:	100

Также часто источниками электротравматизма являются оголенные части питающего кабеля ЭММ (в результате механических повреждений, скручиваний), используемых в энергетическом хозяйстве при заготовке пиломатериалов (13,1%). Основными причинами электротравматизма здесь являются дефекты конструкции мобильных машин, отсутствие контроля и профилактики ЭММ, отсутствие или неисправность традиционных защитных мер (заземление и зануление).

Нередкость когда несчастные случаи возникают при обрыве фазного кабеля удлинителя, применяемого при работе с ЭММ на территории электроэнергетических предприятий или недостатков конструкции штепсельного

разъема, в результате чего опасное подключение вилки питающего провода в розетку электрической сети являются причиной того, что металлические части корпуса ЭММ будут под напряжением 220 В, т.к. нулевой защитный провод находится подключенным к фазному проводу сети.

Таблица 1.10 – Электротравматизм по видам ЭММ

№ признака	Наименование машины	В среднем за 10 лет (2006-2015г.г.) в %
41	Сверлильная	9,3
42	Шлифовальная	7,5
43	Сварочный аппарат	12,6
44	Молоток	11,1
45	Перфоратор	10,3
46	Циркулярный распиловочный станок	13,1
47	Бетоносмеситель	8,8
48	Дрель	16,6
49	Рубанок	6,8
50	Прочие	3,9
	Итого:	100

Анализ имеющихся данных по расследованию произошедших несчастных случаев дал возможность выявить основные опасные ситуации, которые возникали при обслуживании ЭММ и сгруппировать электротравмы по причинам, приводящих к их возникновению. Из таблицы 1.11 следует, что наибольший процент несчастных случаев (33,5%) составляет группа пострадавших от прикосновения к токоведущим частям, находящимся под напряжением. Данная группа случаев не только самая многочисленная, но и представляет наибольшую опасность, т.к. в настоящее время при использовании электрических мобильных машин отсутствует широкое использование устройств защитного отключения, обеспечивающих безопасность при появлении данной опасной ситуации.

Во вторую группу, приводящую к электропоражениям (21,7%), относятся поломка, дефекты и неисправности ЭММ, аварийные режимы при использовании электрооборудования возникают из-за поврежденной изоляции и электрического пробоя и последующего возникновения на металлических частях конструкций весьма опасного электрического потенциала. При принятии мер безопасности таких как защитное заземление или зануление и использование в системе защиты электроустановок (в т.ч. ЭММ) устройств защитного отключения, количество случаев электропоражений могло быть значительно снижено.

Исходя из анализа статистических данных таблицы 1.11 основной опасной ситуацией, следует считать попадание лиц, работающих с ЭММ под фазное напряжение путем непредумышленных прикосновений к токоведущим частям. При неправильном присоединении к распределительной сети ЭММ, плохом техническом состоянии питающих проводов, несоответствии условиям окружающей среды и использовании неквалифицированным персоналом.

Таблица 1.11 – Электротравматизм по основным опасным ситуациям

№ признака	Опасная ситуация	В среднем за 10 лет (2006-2015г.г.) в %
51	Прикосновение к токоведущим частям, находящимся под напряжением (на открытом воздухе)	33,5
52	Прикосновение к токоведущим частям, покрытым изоляцией, потерявшим свои изоляционные свойства (монтажные работы)	21,7
53	Прикосновение к металлическим частям ЭММ, оказавшимся под напряжением в результате пробоя изоляции, к открытым проводящим частям	17,3
54	При использовании удлинителей к питающему кабелю ЭММ	20,7
55	Прочие	6,8
	Итого:	100

К наиболее часто повторяющимся техническим причинам несчастных случаев относятся: невыполнение мероприятий по устранению опасного фактора, ошибочные действия пострадавших и нарушение ими технологии выполняемых работ. К организационным причинам несчастных случаев относятся: низкая трудовая дисциплина, недостаточная организация работ административно-техническим персоналом.

Основными причинами возникновения электротравматизма при эксплуатации ЭММ являются: неудовлетворительная организация работ, грубые нарушение правил техники безопасности (см. таблицу 1.12).

Таблица 1.12 – Причины несчастных случаев при работе с ЭММ

№ п/п	Причины	В среднем за 5 лет (2011-2015г.г.) в %
1	Неудовлетворительная организация работ (рабочих мест)	20,7
2	Нарушение трудовой дисциплины	18,5
3	Нарушение правил техники безопасности	16,3
4	Нарушение инструкции по эксплуатации ЭММ	18,2
5	Недостаточная эффективность средств электрической защиты (автоматических выключателей, пружинных разъединителей)	7,1
6	Пренебрежение к средствам индивидуальной защиты	5,1
7	Прочие (незнание об опасности электрического тока, неосторожность, усталость, снижение внимания)	14,1
	Итого:	100

В целом анализ статистических данных о несчастных случаях позволяет выделить основные признаки (факторы), характеризующие электротравму ее тяжесть и исход. Дадим такую характеристику при работе с ЭММ.

Социальный признак характеризует личность пострадавшего, выделяя при этом возраст и стаж работы, род трудовой деятельности, нами исследуемой.

Временной признак указывает в какой период времени (дня недели) наиболее часто возникают несчастные случаи.

Топографический признак определяет место, где произошел несчастный случай, характеризуя категорию и тип помещения, территории по условиям электробезопасности.

Организационный признак отражает вид, выполняемой человеком, работы на момент возникновения несчастного случая. Характеризуя вид работы необходимо учесть, в том числе работу, связанную с демонтажем, ремонтом и испытанием ЭММ и др.

Технический признак, характеризующий ЭММ, учитывает тип и вид электрической мобильной машины с учетом технических характеристик оборудования электрохозяйства, величину номинального напряжения и тока, наличие средств электрозащиты.

Травмоопасный признак характеризует возникающую ситуацию при которой человек попадает под напряжение, работая с ЭММ, вследствие чего через тело протекает ток опасной величины, определяющий исход электропоражения.

### **1.3 Систематизация факторов, определяющих условия работы ЭММ**

При разработке системы электробезопасности при эксплуатации ЭММ важной составной частью является установление причинно-следственных связей, характеризующих возникновение электротравматизма людей. Это объясняется тем, что использование ЭММ представляет сферу деятельности человека. От состояния сферы деятельности в прямой зависимости находится состояние



здоровья и работоспособность человека, как объекта взаимодействия с основными элементами человеко-машинной системы. Совокупность факторов внешней среды, оказывающих влияние на состояние человека и на эффективность взаимодействия его с машиной представляет условия функционирования данной системы [53].

Работы с применением ЭММ выполняются в сложных специфических условиях, и в настоящее время продолжают оставаться с наиболее высокими показателями электротравматизма на предприятиях электроэнергетики. Введение мониторингового контроля за состоянием эксплуатации ЭММ определяет необходимость рассмотрения производственного и непроизводственного процесса в электроэнергетике как сложной социально-технологической системы, позволяющей научно обосновать уровень электробезопасности, определить характеристики системы с учетом вредного воздействия на организм человека факторов при их совокупном влиянии на безопасность человека [54].

Известно, что электротравму можно рассматривать как сложное событие, на которое воздействует множество объективных и субъективных факторов. Причем эти факторы имеют детерминированный и вероятностный характер [55]. Наличие всех этих факторов создает значительные трудности при установлении причин, от которых в конечном итоге зависит возникновение, тяжесть и исход электротравмы.

Основываясь на концепции системного подхода в электробезопасности, электротравма рассматривается как результат взаимодействия компонентов единой, взаимосвязанной системы «человек – электроустановка – внешняя среда» [56].

Следует подчеркнуть, что именно система, предусматривающая совокупность взаимодействующих между собой компонентов и связей между ними, является (в силу свойства эмерджентности) качественно новым (по сравнению с их суммой) образованием четырех составляющих, а именно «человек – машина – среда – технология» [57]. В общем виде такая модель включает в себя технологическое оборудование – машину; эксплуатирующий ее персонал – человека; рабочую обстановку – среду, взаимодействующих между собой по заданной технологии и организации работ – технологию.

При эксплуатации ЭММ причинно-следственная модель исследования, т.е. электротравмы, включает в себя машину – ЭММ; человека – персонала, занятого выполнением работ; проводимую операцию – представляющую проведение однородных по назначению действий для получения определенного результата на контрольном этапе производственного или технологического процесса при взаимодействии между собой первых двух компонентов системы; окружающую среду – область пространства, в котором совершается проведение операции, также при взаимодействии первых двух компонентов. Следовательно, функционирование отдельно взятой человеко-машинной системы «человек – ЭММ – проводимая операция – окружающая среда» (Ч-ЭММ-ПО-ОС) может рассматриваться как процесс выполнения конкретной операции.

На рисунке 1.6 приведена причинно-следственная модель электротравмы. Рассмотрим составляющие этой модели.

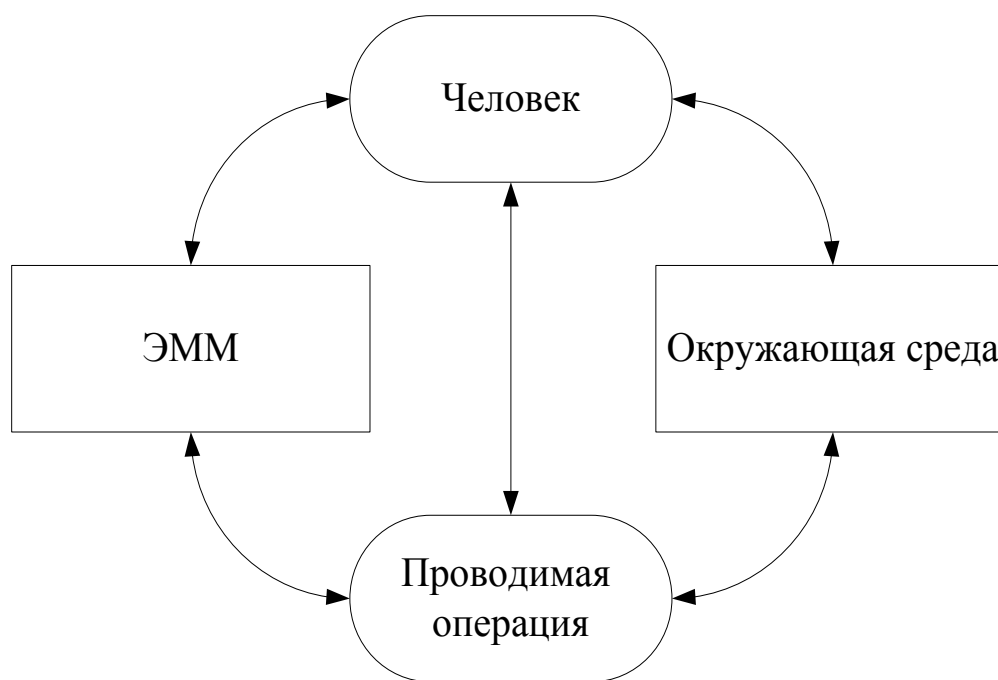


Рисунок 1.6 – Модель объекта исследования

«Человек» – оператор, занятый выполнением работ с ЭММ, связан с окружающей средой и ЭММ непосредственно в процессе его активного воздействия на эти компоненты. Например, выполнением организационно-

технических мероприятий по устранению вредного влияния параметров микроклимата, техническое обслуживание и ремонт ЭММ и другие. Поэтому, возникающая в процессе работы опасная ситуация связана с особенностями деятельности человека, психофизическими свойствами его организма.

«ЭММ» – отображается как орудие труда; характер взаимодействия человека с ЭММ в большей мере зависит от количества последних, применяемых в эксплуатации. ЭММ, как компонент системы, сама является источником возникновения опасной ситуации. Характер и последствия электротравматизма зависят от многих факторов, определяющих режимы работы ЭММ, таких как перегрузки; удары; короткие замыкания, в результате появления механических повреждений и повреждений электрической части машины; наличие шума и вибрации; время работы ЭММ.

«Проводимая операция» – представляет собой совокупность приемов и методов, используемых в процессе эксплуатации ЭММ, включающих свойства и состояние труда, организационно-технические мероприятия по обеспечению безопасности. Осуществляемая операция по заданной технологии непосредственно связана с деятельностью человека, использованием той или иной ЭММ и различной степенью влияния окружающей среды.

«Окружающая среда» – пространство, в котором находятся ЭММ и человек, непосредственно оказывает негативное воздействие на машину и человека. Так, химически активные вещества, повышенная температура и влажность разрушают электрическую изоляцию, тем самым создают условия преждевременного выхода из строя ЭММ, возникающие аварии и электропоражения. Кроме того, воздействие на человека окружающей среды может привести к ряду негативных явлений: уменьшению сопротивления растеканию тока, повышению физиологической чувствительности организма электрическому току, уменьшению сопротивления кожных покровов тела из-за потовыделения.

Обеспечение безопасности использования ЭММ основано на комплексном анализе системы «человек – ЭММ – проводимая операция – окружающая среда» с последующей ее оптимизацией на основе действующих нормативных параметров,

а также санитарно-гигиенических и эргономических требований, изучении механизма совокупного воздействия факторов системы и сопоставлении с нормативными значениями.

Применение ЭММ связано с воздействием на человека вредных и опасных производственных факторов. В частности, таких как повышение или понижение температуры воздуха, время контакта человека с машиной.

Анализ указанных факторов рассмотрим при условии, что процесс эксплуатации ЭММ дифференцирован, и по структурному признаку опасные и вредные факторы действуют постоянно, в соответствии со свойствами специфики работы, при нормальном функционировании процесса. Факторы, характеризующие состояние системы, разделим на две группы: факторы, не зависящие от особенностей применения ЭММ, и факторы, определяемые особенностями применения ЭММ. К первой группе относятся естественно-природные, социальные, экологические и другие. Факторы, относящиеся ко второй группе, подразделяются на производственные и социально-психологические [54]. Вторая группа факторов представляет наибольший интерес, с точки зрения их влияния на безопасность ЭММ, т.к. могут изменяться в ходе выполняемых работ [20].

Для установления причинно-следственных связей и оценки условий эксплуатации ЭММ проанализируем всю совокупность факторов, характеризующих состояние системы «Ч-ЭММ-ПО-ОС».

На рисунке 1.7 приведена блок схема основных факторов, от которых зависит уровень безопасности эксплуатации ЭММ. Такое деление критериев носит условный характер, поскольку в труде, как правило, сочетаются различные компоненты нагрузки, определяющие общее функциональное состояние организма человека. Составляющие части модели назовем подсистемами. Проанализируем факторы каждой подсистемы.

Подсистема «человек». Данная подсистема представляет собой наиболее сложную биологическую составляющую, трудно поддающуюся формализованному описанию. Эффективность функционирования обобщенной подсистемы «человек» неразрывно связана необходимостью формализованного

проведения анализа и учета текущего состояния человека выполняющего определенные действия с ЭММ [29]. Рассмотрим факторы при любом данной подсистемы.

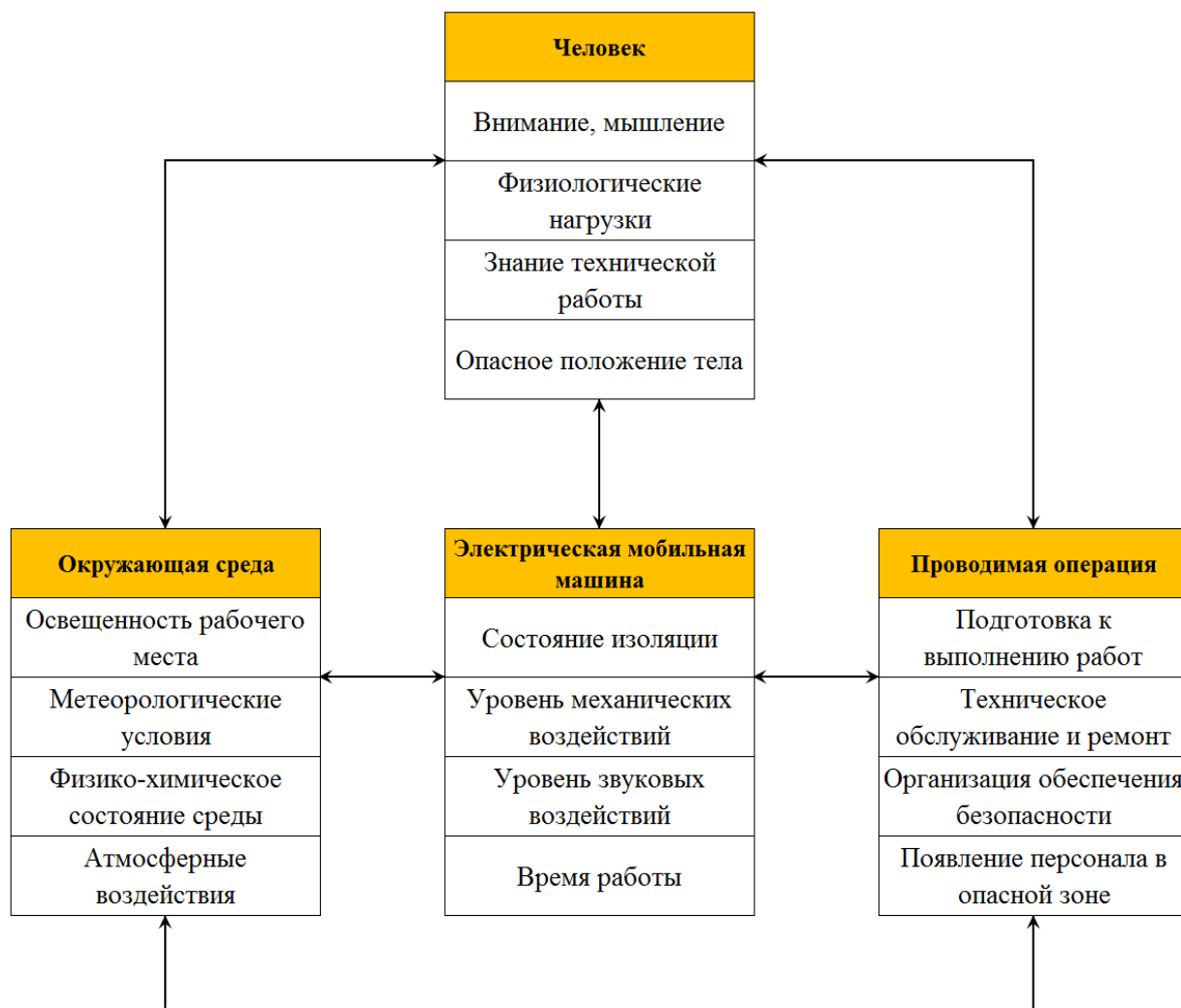


Рисунок 1.7 – Блок-схема факторов, характеризующих условия эксплуатации ЭММ

Фактор «внимание, мышление» – направленность психической деятельности в сознании человека на избирательное восприятие определенных предметов и явлений, т.е. на его внимание и мышление. Требования к вниманию, мышлению в большей или меньшей мере представляют все виды трудовой деятельности. Внимание и мышление возникают вследствие сознательно поставленной цели и требуют определенных волевых усилий.

Фактор внимание, мышление человека-оператора ЭММ играет большую роль, а в отдельных случаях и решающую. Вследствие того, что человек находится в состоянии сосредоточенного внимания степень риска возникновения электротравмы резко снижается или электротравмы может не быть вообще [30]. При возникновении электротравмы тяжесть и исход электротравмирования зависит от состояния центральной нервной системы, а именно, внимание, мышление человека усилием воли направляется на ожидаемое явление, событие, раздражение. Здесь имеется в виду так называемое «непроизвольное оперативное мышление», которое возникает без всякого намерения, без заранее поставленной цели, не требует волевых усилий и вызывается каким-нибудь неожиданным событием или изменением внешней среды [58].

В процессе выполняемых каких-либо работ с применением ЭММ могут быть колебания оперативного мышления – это повторяющееся непроизвольное, отвлечение, ослабление внимания. Также не исключено распределение оперативного мышления – одновременное внимание к двум или нескольким объектам при одновременном выполнении действий с ними, так называемое «рассеяние внимания, мышления», которое безусловно оказывает пагубное влияние на безопасность обслуживания ЭММ.

Фактор «психофизиологические нагрузки». Психофизиологический показатель – интегральное понятие, выражающее степень функционального напряжения организма при работе с ЭММ, требующее преимущественно мышечных усилий и соответствующего энергетического обеспечения [59]. При рассмотрении проблемы обеспечения безопасности необходимо учитывать психологические особенности человека, можно выяснить какие требования к техническим устройствам и средствам безопасности должны разрабатываться, руководствуясь особенностями человеческой деятельности.

Физические нагрузки на организм человека зависят от характера выполняемых работ, от типа ЭММ и могут изменяться в пределах от 15 до 30 кг [60]. Увеличение интенсивности и напряженности работ с применением ЭММ может проявиться в нарушении движений, скованности позы, неадекватно сильных

и быстрых двигательных операций, нарушении координации движений. Происходит нарушение психических процессов и нарушение способности оценки ситуации. При активной физической нагрузке не исключено увлажнение кожи (потоотделение), что увеличивает опасность поражения электрическим током. Такое состояние кожи может наступить при длительном контакте человека с ЭММ.

Фактор «знание технической работы». Технологическая работа человека при эксплуатации ЭММ имеет две составляющие: статистическую и динамическую [61].

Статическая составляющая – процесс сокращения мышц, необходимый для поддержания тела или его частей в пространстве. В зависимости от характера мускулатуры может быть разделена на два вида:

1. Статическая работа по удержанию ЭММ в процессе выполнения человеком производственных операций. Это достигается путем титанического сокращения мышц, возникающего под влиянием мощных нервных импульсов.

2. Статическая работа, направленная на поддержание позы. Эта работа обеспечивается за счет титанических сокращений мышц, она отличается малыми затратами энергии и может продолжаться более длительное время.

Особенностью статической составляющей является более значительное увеличение физиологических показателей (частота пульса, дыхание, потребление кислорода и др.) непосредственно после статической работы по сравнению с процессом работы, чем при работе по сравнению с исходным состоянием.

Динамическая составляющая – процесс сокращения мышц, приводящий к перемещению ЭММ, а также самого тела человека или его частей в пространстве. При этом энергия организма расходуется как на поддержание определенного напряжения в мышцах, так и на механический эффект работы. Динамическая составляющая работы представляет наиболее значимый вид двигательной активности человека в процессе эксплуатации ЭММ. При этом различные части двигательного аппарата могут принимать весьма различное участие в выполнении работы и сама динамическая составляющая всегда сочетается в какой-то степени со статической.

Такое деление критериев носит условный характер, поскольку во время эксплуатации ЭММ, как правило, сочетаются различные компоненты нагрузки, определяющие общее функциональное состояние организма человека.

Фактор «Опасное положение тела». При любом рабочем положении человека его поза должна быть физиологически правильно обоснованной. Неправильное положение тела ведет к быстрому возникновению статической усталости, снижению качества и скорости выполняемой работы, а также снижению реакции на возникновение опасности [54]. Разнохарактерные работы с ЭММ могут быть связаны с выполнением операций в труднодоступных местах. Кроме того, при выполнении работ требуются большие мышечные усилия, что приводит к более быстрому утомлению. Опасное положение тела, связано с неадекватными действиями, резкими произвольными движениями, что увеличивает степень риска возникновения механических повреждений корпуса машины и изоляции токоведущих частей, в частности, питающего кабеля, включаемого в сеть напряжением 220/380 В.

Подсистема «электрическая мобильная машина». Проведенные исследования по безопасности эксплуатации ЭММ показали, что данные машины представляют потенциальную опасность поражения человека электрическим током.

К группе факторов в данной подсистеме относятся основные источники повышенной опасности, возникающие при работе ЭММ. Рассмотрим и проанализируем основные факторы, которые в определенных ситуациях являются опасными и вредными оказывающими отрицательное воздействие на безопасность эксплуатации ЭММ.

Фактор «состояние изоляции». Изоляция ЭММ по своему назначению может быть разделена на следующие виды [62]:

1. Рабочая – изоляция, необходимая для работы машины, например изоляция между пластинами коллектора;
2. Основная – изоляция предотвращающая подачу напряжения на детали, которые у исправной машины под ним не находится, например фазовая изоляция



обмотки двигателя. Эта изоляция осуществляет основную защиту человека от поражения электрическим током;

3. Дополнительная – изоляция, не зависящая от основной, созданная в дополнение к ней для защиты человека от поражения электрическим током в случае повреждения основной изоляции, например пластмассовая втулка между валом и сердечником якоря;

4. Двойная – изоляция, состоящая из основной и дополнительной;

5. Усиленная – улучшенная основная изоляция, обладающая такими механическими и электрическими свойствами, которые обеспечивают такую же степень защиты человека от поражения электрическим током, как и двойная, например корпус выключателя.

Как указано выше по степени защиты ручные машины и их электрические двигатели делятся на три класса: I, II, III.

В настоящее время преимущественное распространение получили машины класса II, использующие для работы электрическую энергию переменного тока при напряжении питающей сети 220В промышленной частоты 50 Гц [21]. В период работы ЭММ, как указано выше, могут подвергаться перегрузкам, ударам, воздействию пыли, влаги, солнечной радиации, воздействию электрических полей, резким перепадам температуры окружающей среды. Следует учитывать, что изоляция теряет свои качества при наличии данных негативных явлений. Например, при перегрузках происходит быстрое старение изоляции и срок ее диэлектрических свойств сокращается. Так перегрузка на 25% сокращает срок службы изоляции до 3-5 месяцев вместо 20 лет [63]. Нагрев корпуса машины свыше 60°С над температурой окружающей среды также приводит к снижению безопасности технического состояния изоляции. Возможны перекручивания и резкие изгибы кабеля, сопровождающиеся механическими повреждениями изоляции, в результате создается травмоопасная ситуация, т.е. ситуация электротравмирования человека. При исправном состоянии основной изоляции может быть повреждена изоляция внутри машины, т.е. нет внешних признаков

неисправности (аварийный режим). В этом случае есть вероятность попадания человека под фазное напряжение.

Фактор «уровень механических воздействий». Механические воздействия проявляются присутствием вибрации при работе ЭММ. Основным источником вибрации в электрических машинах является, механическая несбалансированность ротора. Исследование вибрации создаваемой небалансом ротора, производится на частоте вращения ротора [64]. В машинах переменного тока эта частота иногда может иметь также магнитную составляющую. При исследовании небаланса в ряде случаев чрезвычайно важно установить возможность возникновения теплового небаланса, что устанавливается нагревом ротора до рабочих температур.

Имеет место вибрация статора машины, возбуждаемая магнитными полями. Кроме того, на уровень вибрации оказывает влияние выбор подшипников. Практика показывает, что наиболее интенсивным источником вибрации являются подшипники качения. При выполнении различных видов работ с применением ЭММ, зарегистрированы высокие уровни колебательной энергии в диапазоне частот от 8...500Гц. Резонансные частоты органов человека находятся в пределах от 5 до 30Гц, которые наиболее опасны для возникновения вибропатологии [65]. В соответствии с [66] превышение вибрационных параметров свыше 12 дБ недопустимо. При работе с ЭММ такое воздействие вибрации на человека является потенциально опасным, с точки зрения возникновения вероятности электротравмирования.

Фактор «уровень звуковых воздействий». Данный фактор характеризуется возникновением шума при работе ЭММ. Негативное воздействие шум оказывает, в первую очередь, на центральную нервную систему, как и вибрация. Интенсивность шума зависит от типа машины и характера выполняемых работ.

Работа ЭММ сопровождается присутствием интенсивного шума. Во-первых, электрический двигатель создает шум и, во-вторых, проводимые операции (например, сверление, пробивание технологических отверстий, рубка и сварка металла и др.), от которых в прямой зависимости находятся параметры шума.

Источниками шума электрических машин являются следующие [67]:

1. Электромагнитные силы, действующие в воздушном зазоре между статором и ротором, имеют характер вращающихся силовых волн. Их величина зависит от электромагнитных нагрузок и некоторых конструктивных и расчетных параметров машины.

2. Подшипники, интенсивность шума которых зависит от следующих факторов:

- от качества изготовления самих подшипников;
- от точности обработки под насадку подшипников на вал.

3. Аэродинамические силы, интенсивность этого источника шума зависит от того, насколько хорошо с точки зрения аэродинамики и акустики сконструированы вентилятор и вентиляционные каналы машины, поскольку основную часть аэродинамического шума создает вентилятор.

Шумовое воздействие на работающих разных профессий заслуживает особого внимания. При работе с ЭММ, в частности, с электрическими молотками возникает шум с уровнем звуковой мощности 92-98 дБА с максимумом звуковой энергии в диапазоне 500-8000 Гц, а эквивалентный уровень звука на расстоянии 1 метра от центра машины не должен превышать 85 дБА [68].

При длительном воздействии звуковых колебаний снижается острота слуха, увеличивается кровяное давление, ослабляется внимание, ухудшается зрение, нарушается координация движения, увеличивается расход энергии при одинаковой физической нагрузке, происходят изменения в дыхательном центре. В итоге появляются функциональные нарушения в организме (сердечно-сосудистой системе, желудке, ушах, и др.) [69]. Как следствие, увеличивается количество несчастных случаев, в том числе и по электрическим причинам.

Фактор «время работы». Продолжительность работ со средствами малой механизации и, в частности, с ЭММ определяется рекомендациями [70], в которых разработаны режимы работ, их длительность, с учетом воздействия на человека вредных факторов, таких как вибрация и шум. При выполнении операций, не связанных с основным технологическим процессом, т.е. отдельных видов работ, воздействие опасных и вредных факторов регламентируется в требованиях, приведенных в [66]. Хронометражная оценка использования ЭММ за рабочий день

и суммарная продолжительность операций, сопровождающихся воздействием на работающих вибрации и других факторов приведена в [69]. Согласно, хронометражной оценке время выполнения рабочих операций ЭММ составляет 45-75% всего рабочего времени, подготовительно-заключительные операции – 15-45%, другие работы – 10%. При работе с электромеханическими мобильными машинами, в соответствии с санитарными нормами [60], длительность работ не должна превышать 2/3 рабочего дня.

На объектах электроэнергетики Республики Бурятия проведен анализ существующих режимов работ с применением электрических мобильных машин при выполнении технологических операций таких как, ремонтно-строительных, электромонтажных и др. Результаты анализа показали, что время воздействия вибрации и шума на работающих составляет 60-70% от длительности рабочего дня. Фактическое время контакта работающих с ЭММ составляет 3,5-4,5 часа за полный рабочий день.

Подсистема «проводимая операция». Для уяснения сущности процесса эксплуатации ЭММ, его удобно декомпозировать в виде последовательности существующих операций [71]. Непосредственно выполненная декомпозиция проводимых операций с ЭММ позволяет уточнить содержание основных компонентов данной подсистемы, включающих определенные факторы. Рассмотрим эти факторы.

Фактор «подготовка к выполнению работ». Эффективность трудовой деятельности человека в значительной степени зависит от организации и подготовки рабочего места при эксплуатации ЭММ, а также от факторов нагрузки и его работоспособности, отмечено в [61].

Общая нагрузка, формируется взаимодействием следующих компонентов: предмет и орудия, организация рабочего места, гигиенические факторы производственной среды, технико-организационные мероприятия. Эффективность согласования указанных факторов с возможностями человека зависят от наличия определенной работоспособности, на которую существенное влияние оказывают специфические особенности каждой конкретной операции. В максимальной степени

поддержанию высокого уровня работоспособности способствует правильная подготовка и организация рабочего места.

В соответствии с [72] рабочее место человека в человеко-машинной системе оснащено средствами отображения информации, органами управления и вспомогательным оборудованием, на котором осуществляется его трудовая деятельность.

При подготовке к выполнению работ с ЭММ должны соблюдаться следующие условия:

- создано достаточное рабочее пространство, позволяющее человеку осуществлять все необходимые движения и перемещения в процессе труда;
- обеспечены достаточные физические, зрительные и слуховые связи между человеком и объектом внимания;
- определены допустимые значения факторов окружающей среды;
- созданы необходимые средства защиты от действия опасных и вредных производственных факторов.

Правильная подготовка и компоновка рабочего места, обеспечение удобной позы человека и свободы движений обеспечивают наибольшую эффективность трудового процесса. При любом рабочем положении оператора ЭММ его поза должна быть физиологически правильно обоснованной. Пренебрежение данным фактором приводит к появлению усталости, уменьшению качества и скорости осуществляемой работы, а также к снижению внимания к опасности.

Фактор «техническое обслуживание и ремонт». При техническом обслуживании ЭММ в производственных помещениях и на территории предприятий электроэнергетики в зависимости от проводимой операции на человека оказывают влияние опасные и вредные производственные факторы и окружающая среда, а также на выполняемую работу в целом. Поэтому правильная организация обслуживания ЭММ, проведение ремонтных и профилактических работ имеет исключительно важное значение для предотвращения возникновения электроопасной ситуации.

При этом под правильной организацией понимается строгое выполнение ряда организационных и технических мероприятий и средств, установленных требованиями нормативно-технической документации [62, 73].

Проверка технического состояния, содержания и использования ЭММ по назначению, соблюдение сроков проверки контрольно-измерительными приборами изоляции предусмотрено в техническом освидетельствовании машины [73]. В заключении технического освидетельствования указывается техническое состояние и содержание ЭММ, выявленные недостатки, пригодность ее к дальнейшему использованию и срок дальнейшего технического освидетельствования.

При техническом обслуживании или ремонте ЭММ персонал должен знать особенности машины, схемы, иметь отчетливое представление о возможных опасностях, хорошо знать и выполнять требования по охране труда, приведенные в [73], а также иметь квалификационную группу по электробезопасности, соответствующую выполняемой работе. В таблице 1.13 приведены принципы, определяющие важность и значимость выполняемых мероприятий по обслуживанию и ремонту ЭММ.

Таблица 1.13 – Методы, определяющие важность и сложность выполнения мероприятий

Методы, определяющие важность мероприятий (обслуживание ЭММ)	Методы, определяющие сложность мероприятий (ремонт ЭММ)
1. Повышение уровня безопасности	1. Время требуемое на выполнение
2. Направленность на соблюдение законов и требований	2. Финансовые затраты
3. Улучшение надежности работы	3. Трудоемкость планирования и выполнения
4. Удовлетворенность персонала и специалистов	4. Возможность выполнения своими силами.
5. Прочие	5. Прочие

Фактор «организация обеспечения безопасности». Обеспечение электробезопасности персонала, обслуживающего ЭММ, осуществляется, во-первых, конструктивными решениями при изготовлении этих машин, во-вторых,

организационными и техническими мероприятиями, обеспечивающими правильные действия людей [23, 42].

Известно, что из технических средств защиты ЭММ широкое применение имеют защитное заземление, защитное зануление, применение малых напряжений [42]. В частности, защитному заземлению подлежат металлические корпуса передвижных и переносных трехфазных ЭММ, а однофазные ЭММ (ручной электроинструмент) используются в системах с занулением с нулевым защитным проводником. В помещениях с повышенной опасностью и особо опасных, где используются ЭММ, отмечено ранее, применяются напряжения 42В, и 12В.

Однако, ни одно из рассмотренных выше технических средств не в состоянии обеспечить эффективную защиту человека.

Наиболее эффективным и экономически целесообразным защитным средством, надежно срабатывающем при опасных ситуациях, связанных с непосредственными касаниями токоведущих частей ЭММ и оборудования или при электрических пробоях изоляции и замыканиях на корпус, а также при снижении сопротивления изоляции ниже допустимой величины, являются устройства защитного отключения, т.е. УЗО [74]. Такие устройства являются многофункциональными и значительно повышают безопасность ЭММ в сравнении с широко применяемыми автоматическими выключателями, выполняющими функции защиты от токов коротких замыканий, перегрузок и основную – управление работой электроустановок, в т.ч. ЭММ.

Фактор «появление персонала в опасной зоне». Опасной зоной называется пространство, в котором возможно возникновение опасного или вредного производственного фактора. К опасным относятся зоны, расположенные рядом с не огражденными перепадами по высоте, неизолированными токоведущими частями электрооборудования.

Опасные и вредные производственные факторы могут присутствовать постоянно, возникать периодически или появляться внезапно в результате разрушения оборудования или иных аварий. Поэтому опасные зоны по характеру

действия указанных факторов могут быть как стационарными (постоянными), так и нестационарными.

Нестационарные опасные зоны обычно возникают под действием множества изменяющихся опасных факторов, предвидеть которые не всегда удается. Установить их действие возможно только при тщательном изучении обстоятельств, при которых эта зона образовалась. При эксплуатации ЭММ человек выполняя работу может оказаться в любой из указанных зон.

Поэтому для профилактики несчастных случаев, также электротравм, в опасных зонах целесообразна реализация ниже следующих мероприятий [73]:

1. Устройство предохранительных и защитных приспособлений, блокировок, дублирующих средств безопасности на производственном оборудовании. Ограждение опасных зон – движущихся частей машин и механизмов, зон выделения отлетающих частиц отработанного материала, токоведущих частей электрооборудования, зон высоких температур, вредных излучений, зон, опасных в отношении взрыва, люков и других проемов, работающих площадок, расположенных на высоте.

2. Усовершенствование в соответствии с правилами электробезопасности различных приспособлений для автоматического защитного отключения трансформаторных установок, камер, подстанций, линий электропередач, систем.

3. Установка приборов контроля статического электричества, измерение сопротивления изоляции, контроля взрывоопасной и газо-насыщенной среды.

4. В целях безопасности обслуживающего персонала движущиеся части оборудования, открытые проемы и отверстия в оборудовании, через которые в процессе эксплуатации могут выделяться пламя, газы, пыль, лучистая теплота и др. должны быть надежно ограждены.

При проведении каких-либо операций с ЭММ человек, учитывая производственный или технологический процесс предприятия, использует средства защиты, соблюдая правила безопасности.

Подсистема «окружающая среда». При создании безопасных и безвредных условий эксплуатации ЭММ среда оказывает влияние не только на обеспечение



благоприятных и здоровых условий труда человека, но и на уровень возникновения электротравматизма. Выполним анализ факторов, характеризующих эту подсистему.

Фактор «освещенность рабочего места». Правильно спроектированное и выполненное освещение помещений каких-либо объектов оказывает положительное влияние на работоспособность человека и является важным фактором, с точки зрения, снижения возникновения травмоопасных ситуаций. Нормирование освещенности осуществляется в зависимости от характера и точности выполняемых работ, от вида освещаемой поверхности [75]. В производственных помещениях предприятий электроэнергетики при работе с ЭММ используется система общего освещения, а в отдельных операциях применяется местное освещение.

Фактор «метеорологические условия». Метеорологические условия окружающей среды характеризуются температурой, относительной влажностью и скоростью движения воздуха согласно [76]. Наиболее значительным из указанных параметров, безусловно, является температура воздушной среды. Неблагоприятные метеорологические условия ухудшают физиологическое состояние человека, снижают работоспособность, могут приводить к различным заболеваниям, а также возникновению травматизма людей. Длительное и интенсивное воздействие тепла и холода, оказывает влияние на функциональное состояние организма, приводит к нарушению защитных механизмов и развитию патологического состояния [29]. При работе с ЭММ имеет место охлаждение рук отработанным воздухом и холодным металлом корпуса машины, в данных условиях понижается общая сопротивляемость организма к возникновению травматизма. Исследования показали, что практически в основном при эксплуатации ЭММ отмечается несоответствие температуры окружающей среды в холодный период года санитарно-гигиеническим требованиям, температура воздуха ниже регламентируемой на 2...8 °С. Нормативное значение температуры воздуха, для категории работ с ЭММ на рабочих местах, в соответствии с [72], составляет 15-18°С (за исключением работ на территории предприятий).

Фактор «физико-химическое состояние среды». Состояние воздушной среды в производственных помещениях энергетики оказывает негативное воздействие на качество выполняемых работ с помощью ЭММ и на техническую пригодность машины в эксплуатации. В помещениях при выполнении работ с ЭММ количество выделяемой пыли различного характера превышает допустимую норму на 10-20% [69], поэтому в воздухе рабочей зоны предусматривается использование пылеотделителей и других пылеулавливающих устройств. Также присутствие в воздушной среде взрывоопасных и химически активных веществ, т.е. паров, газов различной концентрации оказывает разрушительное действие на изоляцию ЭММ и срок эксплуатации ее уменьшается. Данный факт негативно отражается на безопасности машины.

Фактор «внешнее воздействие на среду». К внешним воздействиям отнесем относительную влажность воздуха и барометрическое давление. Относительная влажность воздуха представляет собой отношение фактического количества паров воды в воздухе при данной температуре  $D$  ( $г/м^3$ ) [69]. Если в производственном помещении находятся различные источники тепла, температура которых превышает температуру человеческого тела, то тепло от них самопроизвольно переходит к менее нагретому воздухом телу, т.е. к человеку. Повышенная влажность ( $\phi > 85\%$ ) затрудняет теплообмен между организмом человека и внешней средой вследствие уменьшения испарения влаги с поверхности кожи. Также необходимо учитывать негативное влияние атмосферных воздействий на изоляцию токоведущих частей электрооборудования и ЭММ, а именно повышение или понижение температуры, повышение относительной влажности воздуха, что увеличивает риск возникновения электроопасной ситуации.

В Республике Бурятия климат резко-континентальный, которому соответствует, в качестве нормативного значения, давление атмосферного воздуха равное 720 мм.рт.ст. Исходя из климатических условий, атмосферное давление воздуха в течение всего светового дня меняется. Пределы изменения составляют от 715 до 725 мм.рт.ст. Колебания величины атмосферного давления воздуха

негативно отражаются на состоянии здоровья человека, а также на его работоспособности и представляют риск травмирования.

При обосновании целесообразности и перспективности исследований принципа обеспечения безопасности при работе с ЭММ возникает необходимость решения таких трех задач [57, 77]:

- недопущение ошибочных и несанкционированных действий персонала;
- устранение условий возникновения отказов технологического оборудования, в т.ч. ЭММ;
- предупреждение нерасчетных внешних воздействий на людей и технику со стороны окружающей среды.

Для решения указанных трех задач необходимо обеспечить соответственно следующие условия:

- профессиональную пригодность и технологическую дисциплинированность
- высокую надежность и эргономичность используемого технологического оборудования, в т.ч. ЭММ;
- комфортные для людей и безвредные для техники условия окружающей среды.

При выполнении указанных трех условий может быть исключено появление предпосылок к возникновению и развитию электроопасных ситуаций, вызванных несовершенством всех компонентов рассматриваемой человеко-машинной системы.

С учетом практической невозможности или экономической нецелесообразности соблюдения выше приведенных условий возникает необходимость воздействия на проводимую операцию, как центральный компонент модели объекта исследования, приведенной на рисунке 1.6, т.е. установить такой порядок подготовки и проведения работ при котором учитывалась бы реальная возможность появления отдельных предпосылок причинной цепи электротравматизма и предусматривались меры по его

своевременному устранению [19]. Обеспечение требуемой безопасности и сведение к минимуму возникновения электротравматизма, соответственно снижение ущерба от них, может быть достигнуто воздействием на проводимую операцию путем своевременного и качественного контроля персонала и оборудования, также ЭММ, подготовкой к оказанию помощи пострадавшим [23].

Указанные выше задачи и вытекающие из них условия необходимы для обеспечения производственно-экологической безопасности эксплуатации ЭММ.

Исследование и анализ факторов, характеризующих условия эксплуатации ЭММ, являются неотъемлемой частью оценки в развитии и разработке процесса обеспечения электробезопасности, играющей решающую роль в создании системы безопасности данных машин.

Проведенный анализ факторов системы «человек – ЭММ – проводимая операция – окружающая среда» показал, что работы с ЭММ выполняются в специфических условиях. В период работы с машиной человек подвержен воздействию факторов, которые в совокупности оказывают негативное воздействие на эффективность функционирования системы и на состояние электробезопасности эксплуатации ЭММ.

#### **1.4 Задачи исследования**

Выполненный в данной главе анализ показал, что исследования по обеспечению безопасности электрических мобильных машин на основе принципа соответствия нормируемым показателям и разработки средств защиты с заданным высоким уровнем безопасности, пока не завершены.

Поэтому необходимо дальнейшее развитие исследований с расширением круга практических задач по вопросам оценки влияния факторов человеко-машинной системы «Ч-ЭММ-ПО-ОС» на безопасность электрических мобильных машин, что является актуальной научной проблемой повышения безопасности, принятой для решения в диссертации.

Учитывая широкое применение ЭММ на объектах электроэнергетики предлагается для повышения уровня электробезопасности данных машин решить следующие задачи:

1. Проанализировать состояние условий безопасности ЭММ и выполнить систематизацию признаков-факторов человеко-машинной системы, установив их причинно-следственные связи.

2. Провести моделирование комплекса признаков, факторов, характеризующих особенности эксплуатации ЭММ и построить обобщенную математическую модель создания перспективной системы безопасности.

3. Обосновать метод оптимизации основных критериев безопасности человеко-машинной системы и принципы управления безопасностью.

4. Разработать технические средства повышения безопасности ЭММ и определить социально-экономическую эффективность их внедрения.

## 2 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОБИЛЬНЫХ МАШИН

### 2.1 Частотный метод анализа признаков электротравматизма

Для установления причинно-следственных связей рассмотрим всю совокупность признаков, характеризующих электротравму, анализ которых был проведен в параграфе 1.2. В соответствии с этим рассмотрим следующие признаки: возраст и стаж пострадавших; дни недели; топографические условия; виды работ с ЭММ; виды ЭММ; опасные ситуации. Все признаки, указанные в таблицах 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 1.10 и 1.11 имеют свою нумерацию. Исходя из их суммарного количества, по приведенным таблицам электротравма будет характеризоваться 55-ю признаками. Тогда формализованное описание несчастного случая можно представить в виде вектора-признака:

$$F = [П_1, П_2, \dots, П_i, \dots, П_k], (i = 1, \dots, k), \quad (2.1)$$

где  $П_1, П_2, \dots, П_k$  – введенные признаки.

Каждый из этих признаков может принимать значение в пределах от 0 до 1 в зависимости от того, имеет ли место данный признак в конкретном несчастном случае.

Динамика изменения математического ожидания числа электротравм на достаточно представительной выборке рассматриваемых признаков на конкретном интервале времени (в среднем за период 2006-2015гг.) представлена в виде ломаной кривой для каждой таблицы отдельно. Сглаживание статистических кривых изменения среднего (за указанный период) количества электротравм, проведенное методом наименьших квадратов, согласно [57, 78], позволило установить линейные зависимости по каждой из семи групп признаков, рисунки 2.1 – 2.7:

$$f_{П_i} = 1 + K_i \cdot П_i \cdot e^{-0,5j} \text{ т. е.}$$

$$f_B = 36,812\Pi_i^{-0,802}, \quad (2.2)$$

где  $i=1\dots5$  – признак электротравмы по возрасту.

$$f_C = 20,405\Pi_i^{-0,240}, \quad (2.3)$$

где  $i=6\dots9$  – признак электротравмы по стажу.

$$f_D = 21,104\Pi_i^{-0,365}, \quad (2.4)$$

где  $i=10\dots16$  – признак электротравмы по дням недели.

$$f_T = 18,771\Pi_i^{-0,665}, \quad (2.5)$$

где  $i=17\dots30$  – признак электротравмы по топографическим условиям.

$$f_P = 12,630\Pi_i^{-0,229}, \quad (2.6)$$

где  $i=31\dots40$  – признак электротравмы по видам работ с ЭММ.

$$f_{\text{Э}} = 10,703\Pi_i^{-0,665}, \quad (2.7)$$

где  $i=41\dots50$  – признак электротравмы по видам ЭММ.

$$f_O = 39,009\Pi_i^{-0,851}, \quad (2.8)$$

где  $i=51\dots55$  – признак электротравмы по опасным ситуациям.

Кроме того, выделим общую для всех 55 признаков линейную зависимость:

$$f = 25,891\Pi_i^{-0,304}, \quad (2.9)$$

Воспользуемся статистическими данными по электротравматизму, происшедшему на предприятиях электроэнергетики Республики Бурятия, полученными в среднем за период с 2006-2015гг. Общее количество признаков электротравматизма составляет 55. Для последующего анализа статистических данных при построении графиков зависимости электротравматизма от соответствующих признаков «П», приведенных в таблицах 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 1.10 и 1.11 введем буквенные индексы: В – электротравматизм по возрасту пострадавших; С – электротравматизм по стажу пострадавших, Д – электротравматизм по дням недели; Т – электротравматизм по топографическим условиям; Р – электротравматизм по видам работ с ЭММ; Э – электротравматизм по видам ЭММ; О – электротравматизм по признаку опасной ситуации.

На рисунках 2.1-2.8 изображены зависимости электротравматизма, выделенные по группам признаков. Анализ этих зависимостей позволяет установить следующее:

1. Травмирование людей происходит в возрасте от 18 до 24 лет и от 40 до 49 лет. Здесь максимальные относительные частоты повторяемости признака (возраста) составляют для 18-24 – (0,61), 40-49 – (0,58).

2. Больше всего подвергаются электропоражениям лица при длительности стажа – до 1 года (0,74), и от 1 до 5 лет (0,71).

3. По дням недели наибольшее количество несчастных случаев происходит в понедельник, т.е. после выходных дней для основной массы работающих (0,72).

4. По топографическим условиям опасными объектами следует считать вспомогательные помещения: механического отделения (0,79), электро- и газосварочного отделения (0,57) и территории возле строящихся зданий и сооружений (0,68).



5. Среди видов выполняемых работ электротравматизм особенно распространен на сварных работах (0,82), на специальных работах (0,72), в строительных работах (0,41).

6. По видам ЭММ в результате пользования электродрелями, циркулярными распиловочными станками, сварочными аппаратами, электромолотками, несчастные случаи достигают максимальных значений соответственно равны (0,86), (0,68), (0,66), (0,58).

7. По основным опасным ситуациям случаи прикосновений к токоведущим частям электрических мобильных машин и электрооборудования при их эксплуатации на открытом воздухе составляют весьма распространенную категорию несчастных случаев. Относительная частота признака прикосновения составляет здесь 0,91. Также велика частота признака при использовании удлинителей к питающему кабелю ЭММ (0,57).

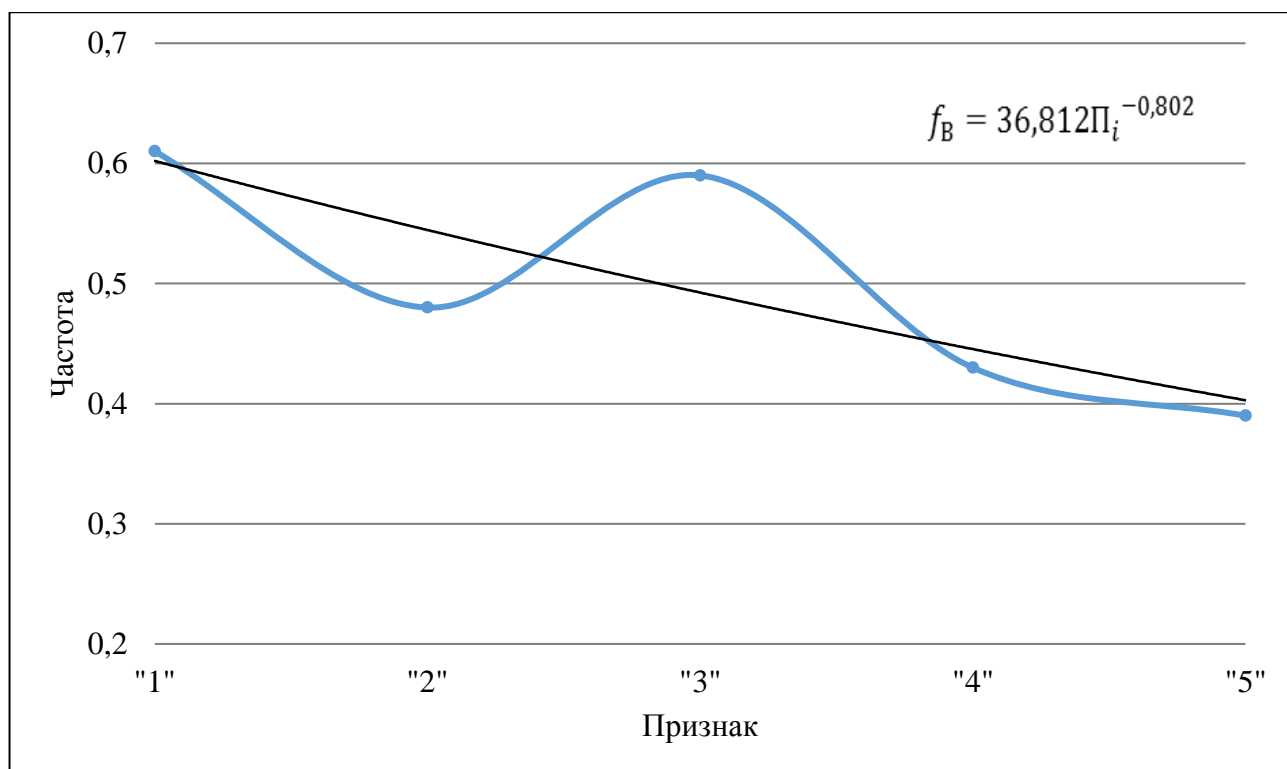


Рисунок 2.1 – График признака электротравматизма по возрасту пострадавших

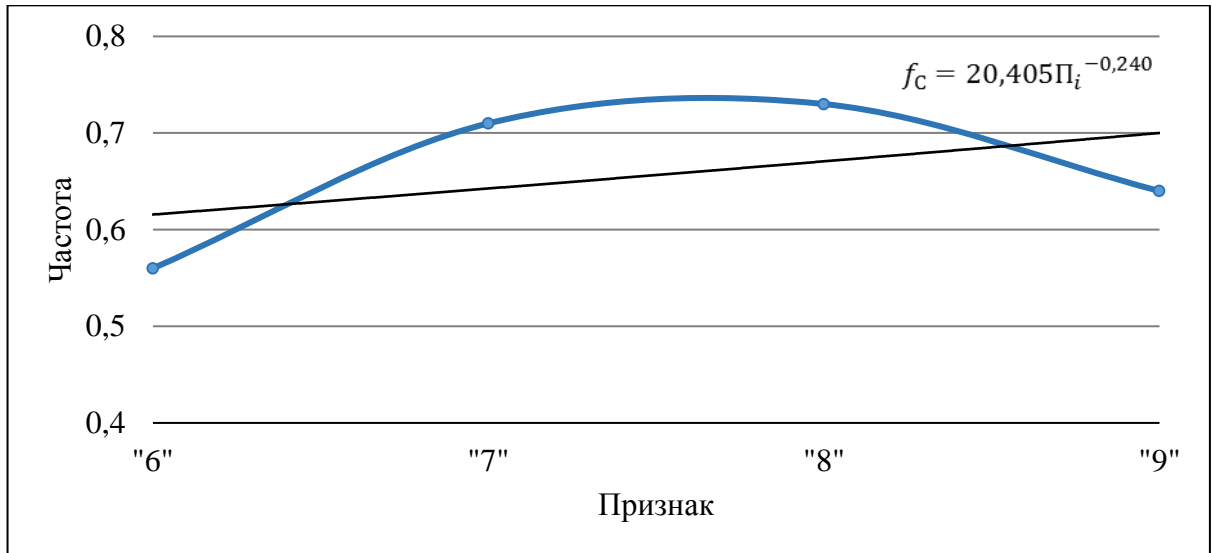


Рисунок 2.2 – График признака электротравматизма по стажу пострадавших

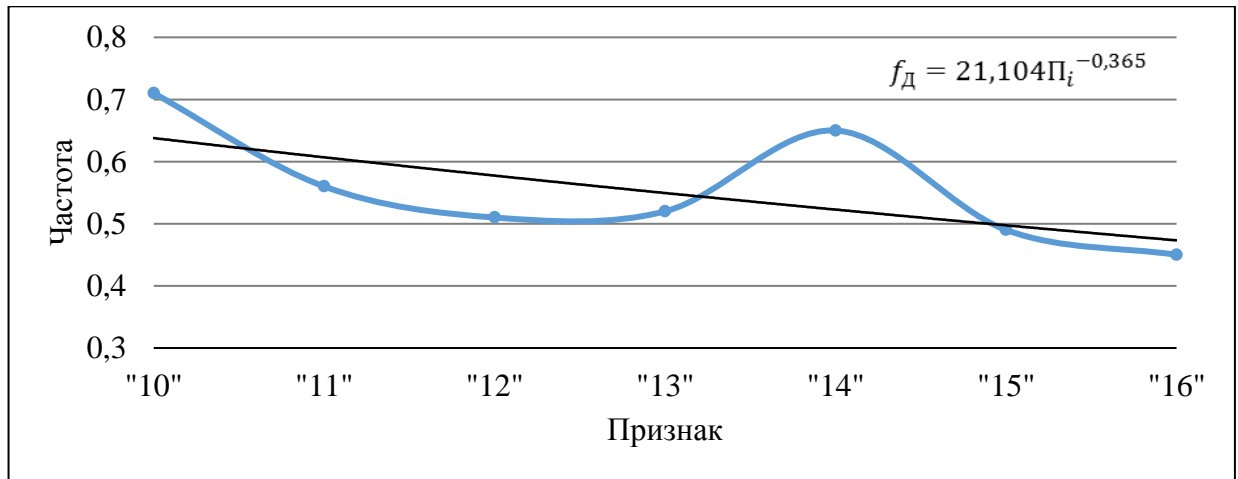


Рисунок 2.3 – График признака электротравматизма по дням недели

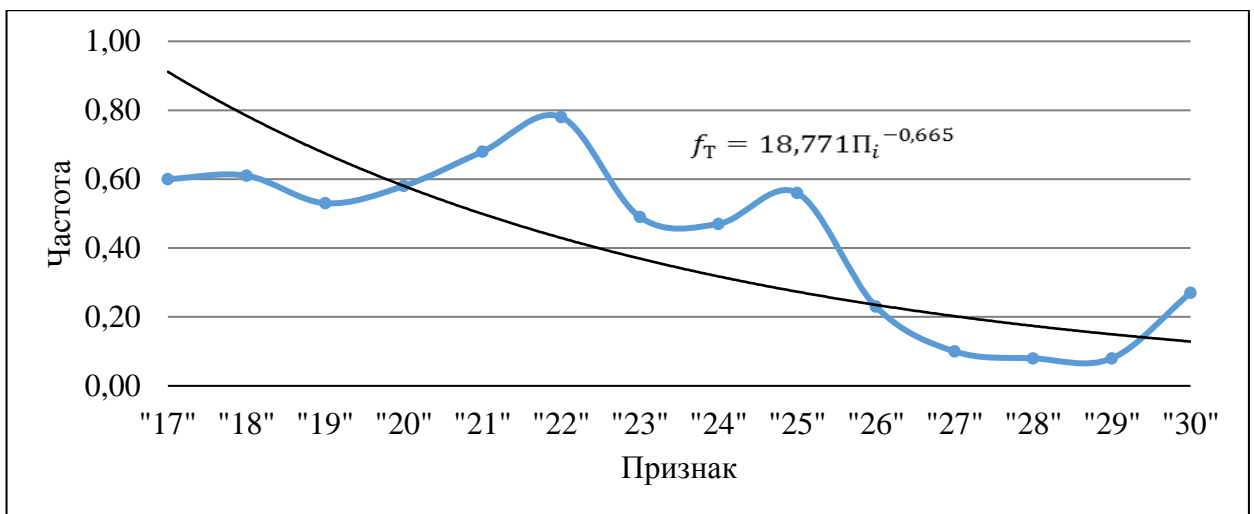


Рисунок 2.4 – График признака электротравматизма по топографическим условиям

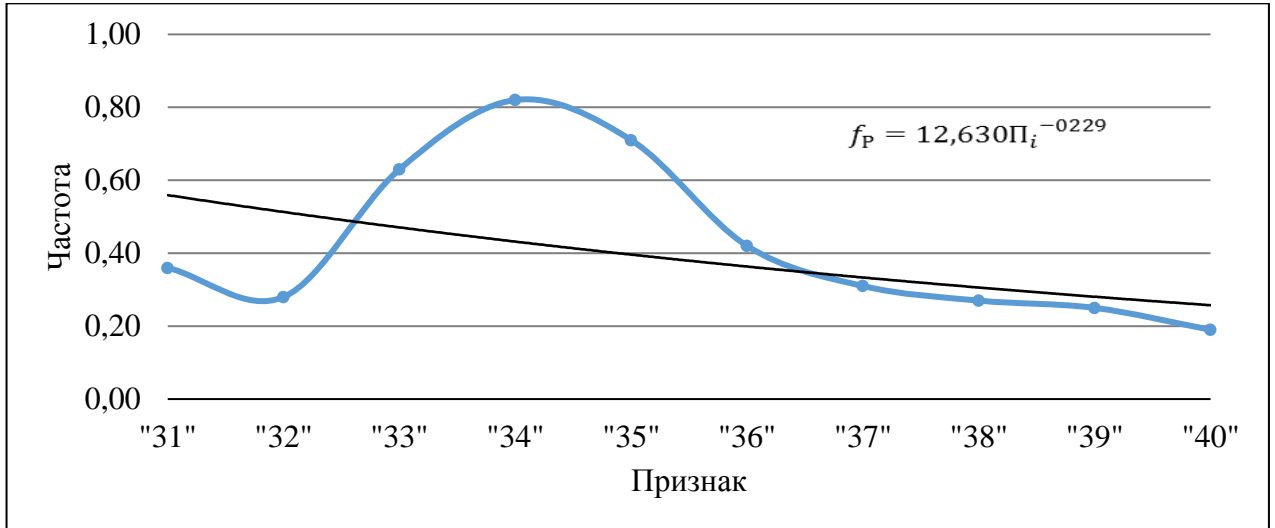


Рисунок 2.5 – График признака электротравматизма по видам работ с ЭММ

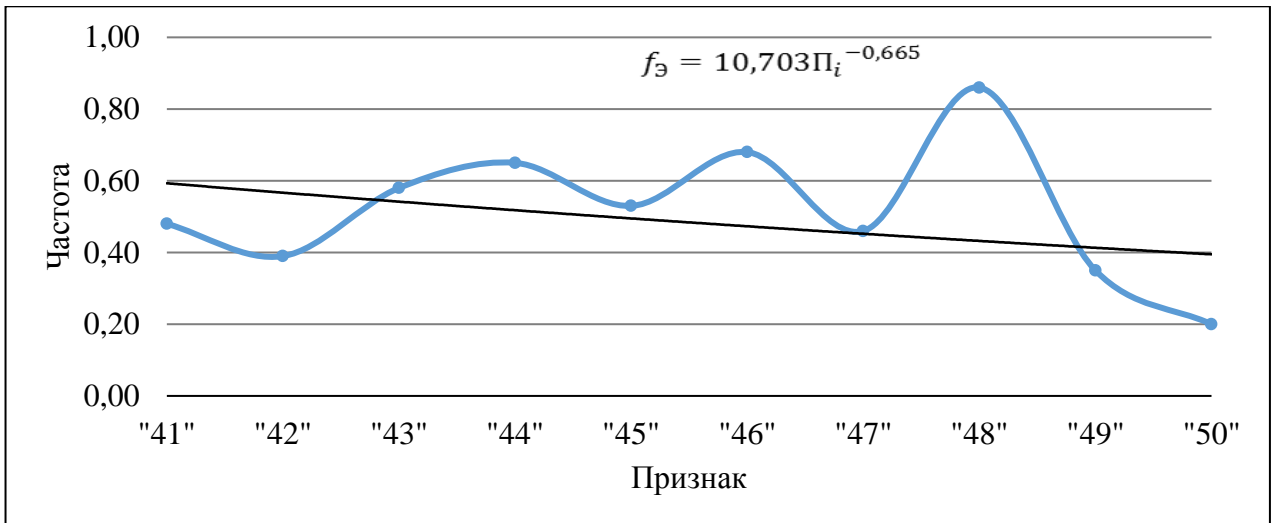


Рисунок 2.6 – График признака электротравматизма по видам ЭММ

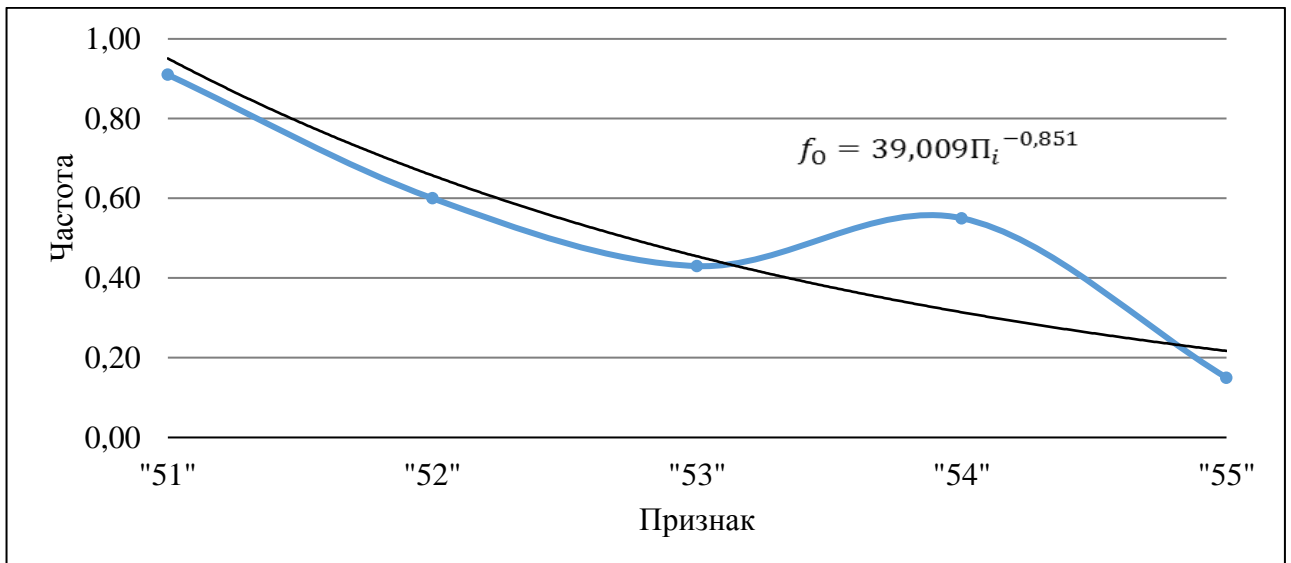


Рисунок 2.7 – Зависимость электротравматизма по признаку опасной ситуации

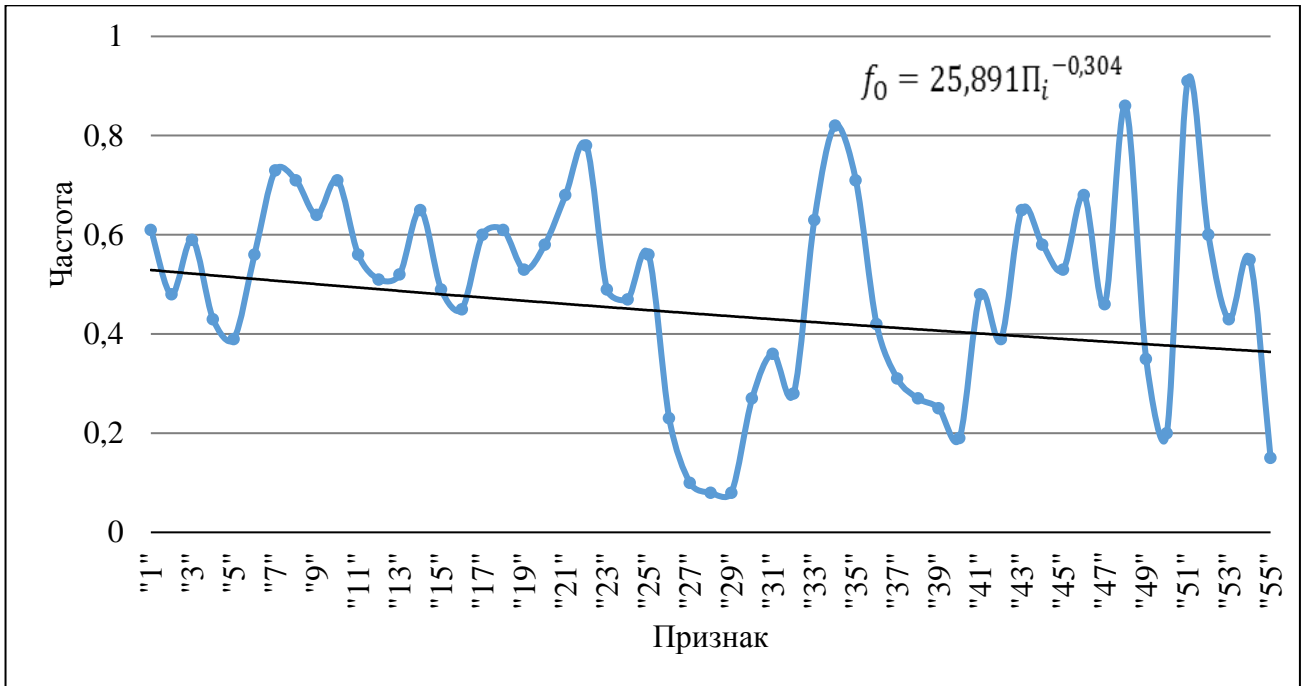


Рисунок 2.8 – Линейная зависимость для 55 признаков электротравматизма

Выполняемый анализ признаков электротравматизма позволяет установить статистическую связь между ними.

Выделим на рисунках 2.1-2.7 значимые признаки, т.е. наиболее чаще повторяющиеся: П<sub>в</sub>, П<sub>с</sub>, П<sub>д</sub>, П<sub>т</sub>, П<sub>р</sub>, П<sub>э</sub>, П<sub>о</sub>. Как было отмечено выше, эти признаки могут принимать логические значения от 0 до 1. Если среди указанных признаков наблюдаются значения приближающиеся к единице, то можно сделать вывод о существовании тесной статистической связи между признаками П<sub>х</sub> и П<sub>у</sub>.

Для установления количественной связи между качественными признаками, характеризующими электротравматизм, воспользуемся так называемым коэффициентом двухфакторной связи, вывод которого дан в [8], запишем уравнение следующим образом:

$$r_{\text{пхпу}} = 1 - \frac{2 - \sum_{i=1}^k (\text{п}_x - \text{п}_y)}{k}. \quad (2.10)$$

Как следует из анализа, коэффициент  $r_{\Pi_x\Pi_y}$  характеризуется двумя пограничными значениями в пределах (0, 1). Если  $r_{\Pi_x\Pi_y} = 0$ , то связь между признаками отсутствует. Если же  $r_{\Pi_x\Pi_y} = 1$ , то между  $\Pi_x$  и  $\Pi_y$  существует полная статистическая связь. Поэтому, при  $r_{\Pi_x\Pi_y} > 0$ , связь между признаками следует учитывать, если  $r_{\Pi_x\Pi_y} < 0$ , то этой связью пренебрегаем.

В таблице 2.1 приведены коэффициенты двухфакторной связи, признаков рассчитанных по данным рисунков 2.1-2.7. Расчету коэффициентов предшествовал содержательный анализ связей между какой-либо парой признаков. Как следует из таблицы 2.1, существует весьма тесная связь (0,710) между признаком прикосновения к проводам с поврежденной изоляцией и лицами в возрасте от 18 до 24 лет, получающими в результате этого электротравму. Имеется также существенная связь (0,605) между использованием ЭММ в особо опасных помещениях и группой лиц со стажем от 5 до 10 лет.

Таким образом, на основании рассмотренного в диссертации частотного метода анализа признаков электротравматизма выявлены из всего многообразия признаков наиболее главные, отражающие существенные свойства изучаемого нами явления.

Таблица 2.1 – Количественная оценка двухфакторной связи

№ п/п	Признак $\Pi_x$ Признак $\Pi_y$	Группы людей		Виды повреждений и неисправностей ЭММ и электрооборудования			
		Возраст 18-24 лет	Стаж 5-10 лет	Электрический пробой изоляции	Механическое повреждение изоляции	Замыкание на корпус	Отсутствие изоляции
1	Прикосновение к проводам с поврежденной изоляцией	0,710					
2	Использование ЭММ в особо опасных помещениях		0,605				

*Продолжение таблицы 2.1*

4	Использование ЭММ на открытом воздухе.			0,516			
3	Работа в помещениях с повышенной опасностью				0,375		
5	Работа в подсобных помещениях с ЭММ и удлинителями					0,331	
6	Применение ЭММ в нерабочем состоянии						0,246

## **2.2 Математический аппарат оценки влияния факторов, определяющих условия работы с электрическими мобильными машинами**

Анализ исследований по разработке оценки влияния факторов на состояние человеко-машинной системы, отвечающей требованиям практических задач, показывает незавершенность решения данной проблемы.

Несчастные случаи, возникающие при эксплуатации электрических мобильных машин, характеризуются не только качественными факторами, но и количественными. Способ оценки количественного фактора может быть выражен баллами. В этом случае возможна сравнительная количественная оценка без ограничений вплоть до установления отношения между исследуемыми факторами. Способ оценки исследуемых факторов средневзвешенными показателями, который наиболее приемлем, требует приведения значений всех факторов системы к одному показателю. Наиболее сложным является приведение к одинаковым единицам измерения [53]. Ограниченность возможности приведения единичных факторов к одному измерителю обуславливает целесообразность использования балльной оценки, которая, согласно работам [79, 80], позволяет оперировать любым количеством факторов и их количественным результатом. Показателем отражающим характерные признаки применения электрической мобильной машины, в частности, ЭММ, является: «опасность» – количественная мера, характеризующая значимость данного фактора в совокупном воздействии комплекса опасных и вредных факторов. Степень опасного воздействия

определяется с целью установления наиболее значимых факторов и их влияние на изменение резульативного показателя. Анализ работы с ЭММ на основе метода анализа качественного влияния факторов на изменения резульативного значения зависит от следующих параметров: отклонения фактического значения; значимости опасного воздействия каждого фактора; параметра, учитывающего совокупное воздействие факторов. При анализе человеко-машинной системы наиболее приемлем интегральный метод оценки факторного влияния обусловленный тем, что значение фактора, выраженное через интегральный балл, может быть приведено к сопоставимому виду, в форме весовых характеристик, а также, при данном методе соблюдается положение о независимости факторов, поскольку исключаются какие-либо предложения о роли факторов до проведения анализа [81].

В качестве универсального метода оценки факторов характеризующих систему «человек – машина – внешняя среда» используется статистический метод Монте Карло [82]. Этот метод отличается простотой и может быть рекомендован для оценки исследуемых факторов, имеющих, сложную структуру и сложные функциональные связи. К недостаткам метода Монте-Карло следует отнести неявную зависимость факторов, характеризующих работу электрических мобильных машин.

Методика количественной оценки состояния системы «человек – машина – внешняя среда», разработанная в [81], базируется на методико-физиологической классификации факторов. Интегральная балльная оценка состояния системы ведется с учетом ведущих значимых факторов, результатов их интегральной оценки. Методика оценки совокупного воздействия на человека различных опасных факторов, базируется на подходе [83], использующем в основном эмпирико-гипотетические зависимости между интенсивностью, экстенсивностью внешнего воздействия и вероятностью возникновения травмоопасных ситуаций. Оценка ведется с использованием показателя факторов системы и зависит от характера выполняемых работ, от вида производства и характеристики применяемых мобильных машин. В указанной работе на основе вероятностного подхода при нормальном законе распределения значений факторов системы и

построении уравнений регрессии разработана методика анализа факторного влияния на условия эксплуатации мобильных машин.

Интегральный метод оценки взаимодействия факторов позволяет выявить их совокупное влияние на эффективность системы «Ч-ЭММ-ПО-ОС». Важной особенностью интегрального метода факторного анализа отмеченного в [79], является то, что он дает общий подход к решению задач самого разного вида, независимо от количества элементов, входящих в модель факторной системы, и формы связи между ними, выявляет производственные факторы, влияющие на обобщающий показатель, т.е. результат.

Предлагаемая в диссертации методика анализа количественного влияния позволяет установить степень значимости факторов подсистем «человек» «ЭММ», «проводимая операция», «окружающая среда» в процессе комплексного воздействия на результативный показатель – безопасность применения электрических мобильных машин. Исходя из методики анализа выявляются факторы (описание и их характеристика приведены в параграфе 1.3), оказывающие влияние на получение результата, при принятом допущении: должно сохраняться постоянство скоростей изменения факторов.

Предположим  $y = f(\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_m)$  – некоторая функция изменения результирующего показателя факторов;  $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_m$  – значения факторов, от которых зависит значение результирующего показателя «у». Необходимо определить долю численного приращения каждого фактора от приращения функции  $y = f(\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_m)$ . Факторы изменяются во времени с известными значениями каждого фактора в «n» точках, в m-мерном пространстве [83].

$$\begin{aligned}
 A_1 &= (\Phi_1^1, \Phi_2^1, \dots, \Phi_m^1), \\
 A_2 &= (\Phi_1^2, \Phi_2^2, \dots, \Phi_m^2), \\
 &----- \\
 A_n &= (\Phi_1^n, \Phi_2^n, \dots, \Phi_m^n),
 \end{aligned}
 \tag{2.11}$$

где  $\Phi_j^i$  – значение j-го фактора в момент i, t – времени;  $A_1, A_2, \dots, A_n$  – значения фиксируемых факторов в m - пространстве.



Предположим, что показатель «у» получил приращение  $\Delta y$  за анализируемый период; тогда функция  $y = f(\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_m)$  дифференцируема, а  $y = f^1 \Phi_j(\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_m)$  – есть частная производная от этой функции по аргументу  $\Phi_j$ . Тогда параметрическое уравнение можно записать в следующем виде:

$$\Phi_j = \Phi_y + (\Phi_j^{i+1} - \Phi_j^i), \quad (2.12)$$

где  $j=1, 2, \dots, m; 0 \leq t \leq 1$ .

Введем обозначение:

$$\Delta y_{ij} = \int_0^1 f_{\Phi_j}^1(\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_m) d\Phi_i. \quad (2.13)$$

Учитывая эти две формулы (2.12) и (2.13), приращение функции можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \Delta y_{ij} = & \int_0^1 f_{\Phi_j}^1[\Phi_1^i + (\Phi_1^{i+1} - \Phi_1^i)t, \Phi_2^i + (\Phi_2^{i+1} - \Phi_2^i)t, \dots, \Phi_m^i \\ & + (\Phi_m^{i+1} - \Phi_m^i)t](\Phi_j^{i+1} - \Phi_j^i) dt, \end{aligned} \quad (2.14)$$

где  $j = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n-1$ .

После соответствующих преобразований и математической обработки выражение (2.14) можно записать в следующем виде:

$$\Delta y_n = \left[ \sum_{j=1}^n \left( \frac{\Phi_j^i}{\Phi_i} \right)^2 \right]^{0.5} \cdot n^{-0.5}. \quad (2.15)$$

Данную методику, интегральной оценки условий эксплуатации электрических мобильных машин применим для расчета воздействия опасных и вредных факторов в подсистемах «человек», «ЭММ», «проводимая операция», «окружающая среда». Оценка условий применения ЭММ сводится к установлению соответствия уровня каждого фактора требованиям нормативно-технических документов. Далее определяется совокупная оценка на основе обобщенного

показателя «опасность» на основании методики предложенной выше. Интегральную оценку условий применения ЭММ определим по формуле (2.15). При этом обозначим:  $\Phi_j^i$  – реальное значение  $j$ -го неблагоприятного фактора системы;  $\Phi_i$  – предельно-допустимый уровень (концентрация)  $i$ -го фактора системы;  $n$  – число измеренных факторов в  $m$ -пространстве. Примем допущение, что при  $\Delta y < 1$  неблагоприятное воздействие факторов отсутствует, в случае  $\Delta y > 1$  воздействие факторов следует считать значимым. Расчет интегрального балла «опасность» в подсистемах «человек», «ЭММ», «проводимая операция», «окружающая среда» основан на среднестатистических значениях показателей опасных и вредных факторов, формирующих условия эксплуатации ЭММ.

Рассмотрим отдельно составляющие единой взаимосвязанной системы «человек – ЭММ – проводимая операция – окружающая среда», определим численный показатель (интегральный балл) для каждого фактора входящего в подсистемы и обобщенный показатель «опасность».

Подсистема «человек».

По приведенной методике определим интегральный балл влияния факторов, формирующих условия эксплуатации ЭММ, т.е. их значимость, в данной подсистеме.

Для определения количественного значения опасности каждого фактора, введем допущение о нормируемых уровнях факторов. С учетом основных эргономически значимых факторов условий работы ЭММ и с использованием показателей соответствия предельно допустимым значениям, определим отклонение фактического уровня этих факторов относительно нормативного значения, т.е. интегральный балл, а именно, значимость влияния фактора, определяющего условия эксплуатации ЭММ [84, 85, 86] в подсистеме «человек» используя выражение (2.15).

Результаты расчетов параметров, учитывающих степень опасного и вредного влияния факторов, определенные методом интегральной балльной оценки, приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Интегральная оценка факторов, влияющих на условия эксплуатации ЭММ в подсистеме «человек»

Факторы	Усл. обозн. (ед. изм).	Фактическое значение фактора					Норм. знач. фактора	Интегральный балл	
		$\Phi_{j1}^1$	$\Phi_{j2}^1$	$\Phi_{j3}^1$	$\Phi_{j4}^1$	$\Phi_{j5}^1$		$\Phi_H^1$	Обозначение
Внимание, мышление	В, (усл. ед)	14	16	13	17	15	10-12	$I_1^ч$	1,73
Психо-физиологические нагрузки	Н, (Кг)	28	29	27	28	28	20-25	$I_2^ч$	1,28
Знание технической работы	Р, (Вт)	59	63	65	58	63	45-60	$I_3^ч$	1,25
Опасное положение тела	Т, (отн. ед)	0,61	0,64	0,59	0,57	0,61	0,55	$I_4^ч$	1,13

Как видно из таблицы 2.2, факторы формирующие условия эксплуатации ЭММ по значимости величины интегрального балла, располагаются в следующей последовательности: внимание, мышление ( $I_1^ч=1,73$ ) оказывает большое влияние на возникновение опасной ситуации; следующие факторы – «психофизиологические нагрузки» ( $I_2^ч=1,28$ ), «знание технической работы» ( $I_3^ч=1,25$ ), «опасное положение тела» ( $I_4^ч=1,13$ ), следует считать неблагоприятными и оказывающими отрицательное воздействие на результат, в последовательности определенной интегральным баллом.

Для определения обобщенного показателя совокупного неблагоприятного воздействия факторов при эксплуатации ЭММ применим формулу, представляющую величину интегрального балла «И»:

$$И = \left[ \sum_{j=1}^n \left( \frac{\Phi_i}{\Phi_{Hj}} \right)^2 \right]^{0.5} * n^{-0.5}, \quad (2.16)$$

где  $\Phi_i$  – среднее значение  $i$ -го неблагоприятного фактора;  $\Phi_{Hj}$  – нормируемое значение фактора.

Для подсистемы «человек», обобщенный показатель «опасность», т.е. интегральный балл составляет  $И^ч=1,53$ .

Подсистема «ЭММ».

Опасные и вредные факторы, которые оказывают наибольшее влияние на появление опасной ситуации, имеют значительные превышения нормируемых значений.

Рассмотрим опасное влияние факторов, характеризующих состояние подсистемы «ЭММ». Используя выражение (2.15), определим количественный показатель опасного воздействия каждого фактора данной подсистемы на условия эксплуатации ЭММ. После соответствующих расчетов, полученные значения анализируемых факторов запишем в виде интегрального балла, исходя из уравнения (2.16), расчетные данные приведем в таблице 2.3.

Как видно из таблицы 2.3, наибольшее неблагоприятное воздействие на условия применения ЭММ оказывает фактор «время работы», величина интегрального балла составляет  $И_4^э=1,78$ . Следующим фактором, который оказывает опасное воздействие, является – «состояние изоляции», интегральный балл которого составляет  $И_1^э=1,33$ ; влияние фактора – «уровень механических воздействий», считается также значимым, количественный показатель равен  $И_2^э=1,28$ , далее, соответственно по величине интегрального балла опасным фактором является «потенциал звуковых воздействий»,  $И_3^э=1,16$ .

Таблица 2.3 – Интегральная оценка факторов, влияющих на условия эксплуатации ЭММ в подсистеме «ЭММ»

Факторы	Усл. обозн. (ед. изм).	Фактическое значение фактора					Норм. знач. фактора	Интегральный балл	
		$\Phi_{j1}^2$	$\Phi_{j2}^2$	$\Phi_{j3}^2$	$\Phi_{j4}^2$	$\Phi_{j5}^2$		$\Phi_H^2$	Обозначение
Состояние изоляции	И, (МОм)	4,1	4,8	4,2	4,6	4,3	5	$I_1^{\exists}$	1,33
Уровень механических воздействий	V, (дБ)	87	86	90	89	88	85	$I_2^{\exists}$	1,28
Уровень звуковых воздействий	Po, (дБА)	125	128	131	134	129	110	$I_3^{\exists}$	1,16
Время работы	t, (мин)	235	225	230	215	225	210	$I_4^{\exists}$	1,78

Для интегральной оценки условий эксплуатации ЭММ, при совокупном воздействии всех факторов, используем обобщенный показатель «опасность», который определяется из выражения (2.16), интегральный балл составил  $I^{\exists}=1,56$ .

Подсистема «проводимая операция».

Исходя из анализа факторов, определяющих состояние системы безопасности эксплуатации ЭММ, в зависимости от технологии какого-либо вида работы, рассмотрим основные негативные воздействия компонентов подсистемы «проводимая операция». Руководствуясь ранее изложенной методикой дадим оценку факторов данной подсистемы, на основании анализа, приведено в параграфе 1.3. В зависимости от возникновения событий или предпосылок к ним нормируемые значения факторов приводятся в относительных единицах в пределах  $0 < 0,5 < 1$  [87]. Количественный показатель опасного воздействия каждого фактора при работе ЭММ в этой подсистеме определим с помощью выражения (2.15). Результаты выполненных расчетов интегрального балла для каждого фактора внесем в таблицу 2.4.

Расчетные данные показывают, что факторы, такие как: «подготовка к выполнению работ», «техническое обслуживание и ремонт», «появление персонала в опасной зоне» оказывают незначительное опасное воздействие, т.е. отрицательное воздействие этих факторов отсутствует. В соответствии с принятым допущением величина интегрального балла  $I^0$  меньше единицы. Поэтому значимым фактором будет «организация обеспечения безопасности»  $I_3^0=0,99$ , т.е. величина интегрального балла близка к единице.

Условия применения ЭММ, которые определяются показателем «опасность» воздействия факторов подсистемы «проводимая операция» определяется значением интегрального балла  $I^0=0,98$ .

Таблица 2.4 – Интегральная оценка факторов, влияющих на условия эксплуатации ЭММ в подсистеме «проводимая операция»

Факторы	Усл. обозн. (ед. изм).	Фактическое значение фактора					Норм. знач. фактора	Интегральный балл	
		$\Phi_{j1}^3$	$\Phi_{j2}^3$	$\Phi_{j3}^3$	$\Phi_{j4}^3$	$\Phi_{j5}^3$		$\Phi_H^3$	Обозначение
Подготовка к выполнению работ	$O_1$ , (отн. ед)	0,56	0,84	0,72	0,68	0,86	0,5-1	$I_1^0$	0,71
Техническое обслуживание и ремонт	$O_2$ , (отн. ед)	0,78	0,87	0,73	0,82	0,79	0,5-1	$I_2^0$	0,84
Организация обеспечения безопасности	$O_3$ , (отн. ед)	0,99	0,97	0,95	0,98	0,87	0,513	$I_3^0$	0,99
Появление персонала в опасной зоне	$O_4$ , (отн. ед)	0,67	0,81	0,75	0,69	0,88	0,5-1	$I_4^0$	0,78

Подсистема «окружающая среда».

Анализ факторов, характеризующих условия эксплуатации электрических мобильных машин, проведенный в параграфе 1.3, позволяет выделить основные неблагоприятные факторы в подсистеме «окружающая среда».

В соответствии с ранее приведенной методикой, определим интегральную оценку факторов подсистемы «окружающая среда».

Определяем по формуле (2.15) интегральный балл влияния каждого фактора подсистемы «окружающая среда» на возникновение травмоопасной ситуации. Расчетные значения интегрального балла факторов и подсистемы «окружающая среда» приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Интегральная оценка факторов, влияющих на условия эксплуатации ЭММ в подсистеме «окружающая среда»

Факторы	Усл. обозн. (Ед. изм).	Фактическое значение фактора					Норм. знач. фактора	Интегральный балл	
		$\Phi_{j1}^4$	$\Phi_{j2}^4$	$\Phi_{j3}^4$	$\Phi_{j4}^4$	$\Phi_{j5}^4$	$\Phi_H^4$	Обозначение	Значение
Освещенность рабочего места	Е, (Лк)	160	150	170	140	155	150-180	$I_1^S$	0,89
Метеорологические условия	$t^\circ$ , ( $^\circ\text{C}$ )	12	15	10	13	11	15-23	$I_2^S$	1,26
Физико-химическое состояние среды	С, (мг/м <sup>3</sup> )	6,5	7,2	4,3	5,1	3,8	4-6	$I_3^S$	0,83
Атмосферные воздействия	Р, (мм.рт.ст)	710	715	710	715	720	720-725	$I_4^S$	0,74

Анализ полученных данных показывает, что факторы подсистемы «окружающая среда» оказывают незначительное воздействие на возникновение опасности и отрицательное воздействие факторов отсутствует, т.к. согласно принятого допущения величина интегрального балла  $I^S$  меньше единицы.

Основным фактором, который будет являться значимым, отнесем «метеорологические условия» - величина интегрального балла составляет  $I_2^S=1,26$ .

Показатель «опасность» совокупного воздействия факторов подсистемы «окружающая среда» вычисленный по формуле (2.16) составляет  $I^S=0,93$ .

Из результатов интегральной оценки следует, что прогнозирование, планирование уровня безопасности электрических мобильных машин, необходимо осуществлять с помощью выбора оптимальных по безопасности управляемых факторов системы «человек – ЭММ – проводимая операция – окружающая среда».

Анализ обобщенного метода совокупного воздействия факторов «человек», «ЭММ», «проводимая операция», «окружающая среда» позволяет установить уровень безопасности условий эксплуатации ЭММ в зависимости от управляемых факторов подсистем. Из анализа факторного влияния следует вывод, что важную роль в обеспечении уровня безопасности играют факторы подсистемы «ЭММ», обобщенный интегральный балл, которых составляет  $I^Э=1,56$ , данный показатель отражает не только время работы и снижение сопротивления изоляции ЭММ, но и уровень влияния на человека других факторов, характеризующих использование машины. В совокупности факторы подсистемы «ЭММ» в определенной степени оказывают влияние на возникновение опасной ситуации и развитие каких-либо паталогических изменений в организме человека, связанных с опасным и вредным воздействием такого сопутствующего фактора как уровень механических воздействий.

Обобщенный интегральный балл неблагоприятного воздействия факторов подсистемы «человек» составляет  $I^Ч=1,53$ . По величине показателя «опасность» обобщенного интегрального балла  $I^Э$ ,  $I^Ч$  следует считать значимыми.

### **2.3 Анализ показателей техногенной опасности возникновения электротравмирования при эксплуатации ЭММ**

Производственная деятельность потенциально опасна, так как связана с проведением технологических процессов, а последние с электропотреблением



(выработкой, преобразованием электрической энергии и др.). При этом возникает техногенная опасность, которая проявляется в результате несанкционированного или неуправляемого выхода энергии, накопленного в технологическом оборудовании, установках, в окружающей среде. В свою очередь несанкционированный или неуправляемый выход энергии приводит к травматизму и гибели людей. Поэтому техногенная опасность является следствием, причинной цепи предпосылок, приводящих к потере управления технологическим процессом, оборудованием, установками и др. [71]. В частности, рассмотрим состояние системы «человек – ЭММ – проводимая операция – окружающая среда» и определим оценку техногенной опасности электротравмирования человека при эксплуатации ЭММ.

Применение интегрального метода оценки влияния факторов системы «Ч-ЭММ-ПО-ОС» на условия эксплуатации ЭММ позволяет установить показатели техногенной опасности возникновения электротравмирования людей.

Приведенный в параграфе 2.2 анализ полученных данных показывает, что численный показатель «опасность», вычисленный для каждой подсистемы в интегральной форме отражает возможность возникновения электротравматизма.

При исследовании и анализе условий эксплуатации ЭММ, наблюдаются стохастические зависимости электротравматизма от рассматриваемых выше факторов, связь между величинами которых проявляется в том, что имеются факторы, реагирующие на изменение другого, изменением своего значения, а отличаются приближенностью и неопределенностью [79, 88]. Они проявляются только в среднем значении при неоднократном количестве наблюдений. Поэтому, при анализе возникновения электротравмирования человека в зависимости от различных опасных факторов, используем методы математической статистики [89]. Изменение анализируемого процесса возникновения электротравматизма можно представить, как случайный процесс, в котором требуется установить и оценить зависимость изучаемой величины от одной или нескольких других величин. Данная зависимость проявляется в том, что при изменении одной из

величин изменяется значение другой. При анализе условий применения ЭММ интегральным методом были определены количественные оценки значимости отдельных факторов в динамике изменения. Вероятностный метод анализа позволяет дополнить интегральный метод т.е. описать математически и установить корреляционные зависимости степени влияния отдельных факторов на вероятность возникновения техногенной опасности и развитие электротравматизма [90, 91].

Все факторы, от которых зависит электротравматизм, действуют в комплексе, взаимосвязано. Оптимизация факторов дает возможность определить степень воздействия каждого из них на величину исследуемого процесса. Для определения интенсивности и аналитической формы взаимозависимости факторов используем методы корреляционного и регрессивного анализа, которые позволяют решить следующие задачи [57, 92]:

- выделить существенные и несущественные факторы, установить относительную степень зависимости электротравматизма от каждого фактора;
- определить, как изменяется величина исследуемого процесса при изменении факторов;
- установить закономерности влияния факторов на развитие электротравматизма человека;
- количественно выразить взаимосвязь между факторами системы.

Для решения поставленных задач построим структурно-логическую блок-схему факторной системы безопасности на основании рассмотренного в диссертации интегрального метода оценки влияния опасных факторов на условия эксплуатации ЭММ (см. рисунок 2.9). При этом выявлены, из всей совокупности факторов главные, отражающие наиболее существенные свойства рассматриваемого процесса, количественные значения которых были приведены в параграфе 2.2.

Приведем аналитическое уравнение, которое характеризует зависимость между двумя показателями [85, 89, 90]:

$$Y_x = a + bx, \quad (2.17)$$

где  $x$  – факторный показатель условий эксплуатации ЭММ;

$a$  и  $b$  – параметры уравнения регрессии, которые требуется определить;

$Y_x$  – результативный показатель техногенной опасности возникновения электротравмирования человека.

Это уравнение описывает такую связь между двумя факторами, при которой с изменением значения факторного показателя на определенную величину наблюдается равномерное возрастание или убывание значений результативного показателя.

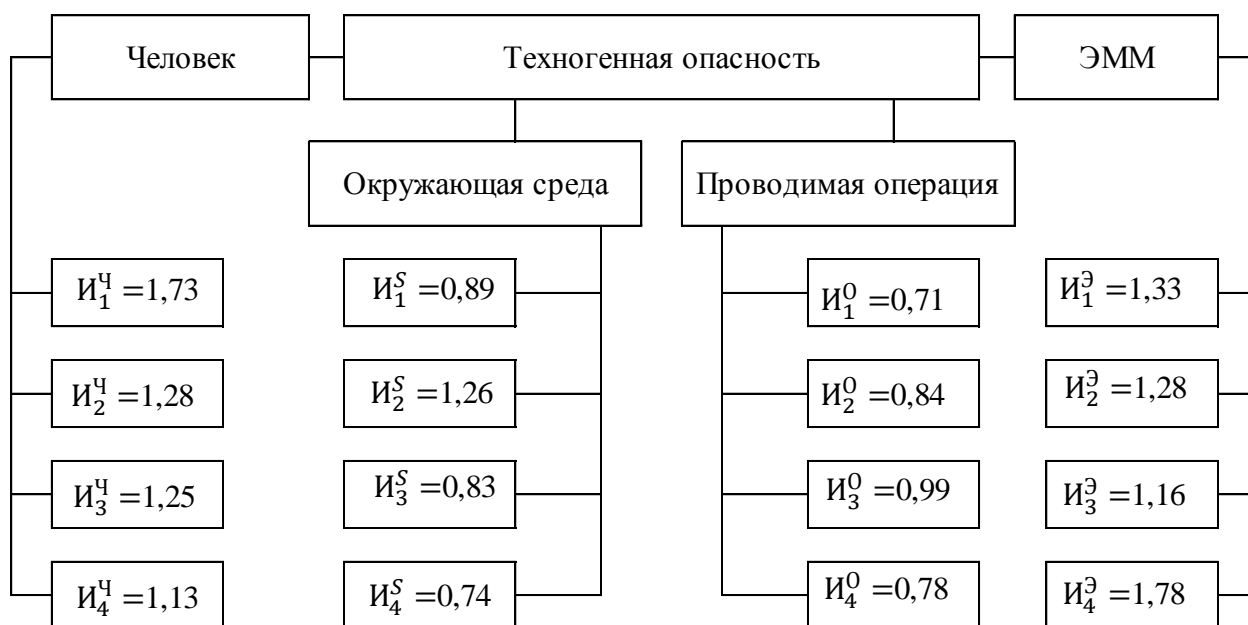


Рисунок 2.9 – Структурно-логическая блок-схема интегральной оценки факторов условий эксплуатации ЭММ

Используя формулу связи (2.17), определим зависимость показателя техногенной опасности электротравмирования от воздействия факторов при эксплуатации ЭММ. Для этого согласно [90] необходимо решить систему уравнений (2.18). Из данной системы уравнений, полученных по способу наименьших квадратов, определяем значения коэффициентов  $a$  и  $b$ .

$$\begin{aligned} na + b \sum x &= \sum y, \\ a \sum x + b \sum x^2 &= \sum xy, \end{aligned} \quad (2.18)$$

где  $n$  – количество наблюдений.

Коэффициент « $a$ » – постоянная величина результативного показателя техногенной опасности, которая не связана с изменением данного фактора. Параметр « $b$ » показывает среднее изменение результативного показателя с повышением или понижением величины фактора на единицу его изменения.

Значения  $\sum x, \sum y, \sum xy, \sum x^2$  рассчитываются на основе фактических исходных данных. Тесноту связи между факторами и показателя техногенной опасности определим с помощью коэффициента корреляции ( $r$ ), и коэффициента детерминации ( $d$ ), которые рассчитываются по следующим формулам:

$$r = \frac{\delta_{xy}^2}{\delta_x + \delta_y}, \quad (2.19)$$

$$d = r^2. \quad (2.20)$$

Коэффициент корреляции может принимать значения от 0 до  $\pm 1$ .

Чем ближе его величина к 1, тем более тесная связь между значениями факторов рассматриваемой зависимости. Использование коэффициента детерминация позволяет установить процентную зависимость влияния исследуемого фактора, а также других факторов на величину показателя техногенной опасности электротравмирования.

Из рисунка 2.9 следует, что наиболее значимыми факторами являются в подсистеме «человек» – внимание, мышление ( $I_1^Ч=1,73$ ); в подсистеме «ЭММ» – время работы ( $I_4^Э=1,78$ ); в подсистеме «проводимая операция» – организация обеспечения безопасности ( $I_3^0=0,99$ ); в подсистеме «окружающая среда» – метеорологические условия ( $I_2^S=1,26$ ). Для определения влияния данных факторов на изменение показателя техногенной опасности ( $Y_x$ ) электротравмирования

используем уравнение (2.17), характеризующее взаимосвязь с факторным показателем ( $x$ ).

Для выделенных выше факторов подсистем «человек», «ЭММ», «проводимая операция», «окружающая среда» определим уравнения связи, используя статистические и экспериментальные данные по анализу условий применения ЭММ на объектах электроэнергетики Республики Бурятия.

Регрессионный анализ полученных данных с линеаризацией по методу наименьших квадратов согласно [92], позволил получить следующие уравнения регрессии для показателей техногенной опасности электротравмирования при эксплуатации ЭММ, исходя из уравнений (2.17) и (2.18).

$$\begin{aligned} B_1^{\text{Ч}} &= 0,606 - 0,019B, \\ B_4^{\text{Э}} &= -0,292 + 1,653t, \\ B_3^0 &= 0,923 - 1,385O_3, \\ B_2^{\text{С}} &= 2,532 - 1,568t^{\circ}, \end{aligned} \tag{2.21}$$

где  $B_1^{\text{Ч}}$ ,  $B_4^{\text{Э}}$ ,  $B_3^0$ ,  $B_2^{\text{С}}$  – значения показателей техногенной опасности электротравмирования;

$B$ ,  $t$ ,  $t^{\circ}$ ,  $O_3$  – соответствующие факторы подсистем (внимание, мышление; время работы; организация обеспечения безопасности; метеорологические условия).

Полученные графические зависимости (рисунки 2.10, 2.11, 2.12, 2.13), представляют изменение показателей техногенной опасности электротравмирования при работе с ЭММ, в зависимости от воздействия определенного фактора системы «Ч-ЭММ-ПО-ОС» и установить причинно-следственные связи между исследуемыми факторами.

Анализ полученных данных показывает, что все факторы оказывают влияние на возникновение электротравмирования.

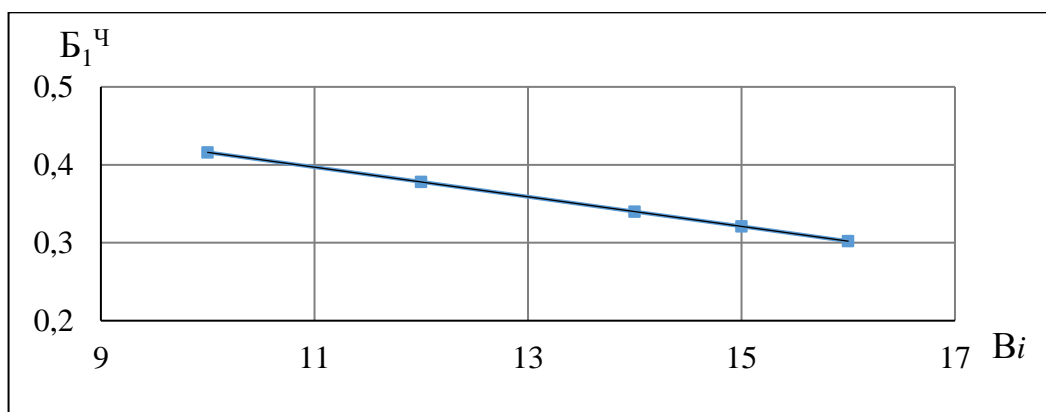


Рисунок 2.10 – Зависимость техногенной опасности электротравмирования от фактора «внимание, мышление»

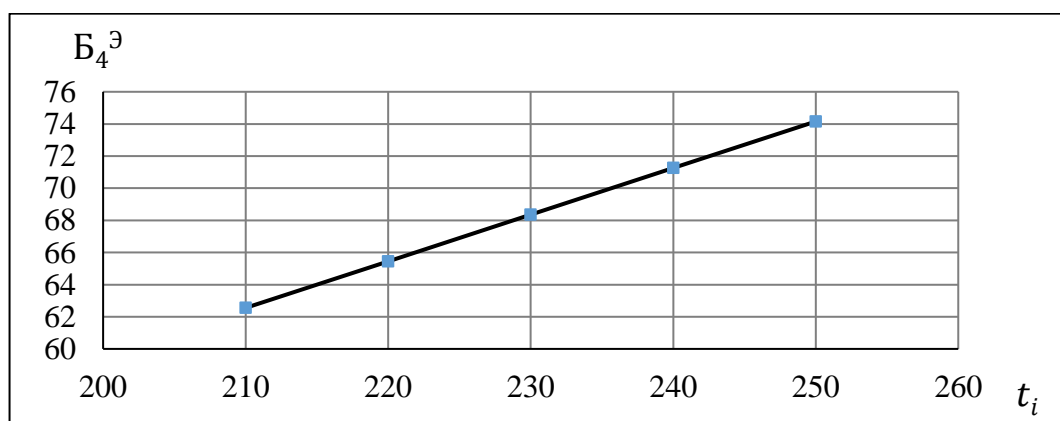


Рисунок 2.11 – Зависимость техногенной опасности электротравмирования от фактора «время работы»

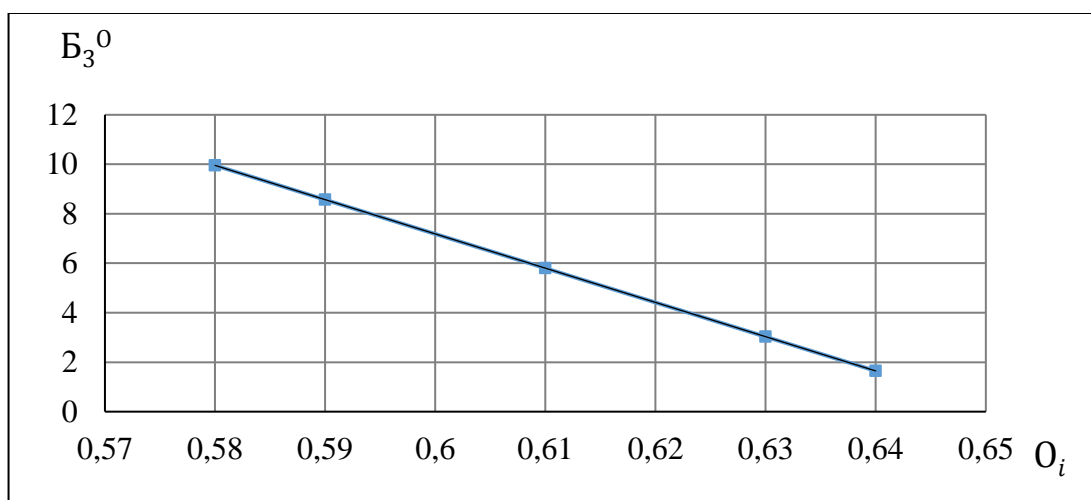


Рисунок 2.12 – Зависимость техногенной опасности электротравмирования от фактора «организация обеспечения безопасности»

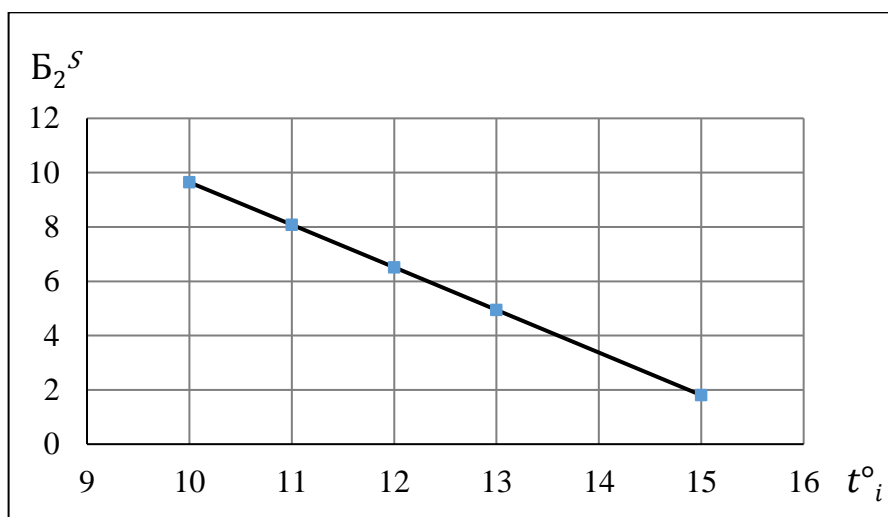


Рисунок 2.13 – Зависимость техногенной опасности электротравмирования от фактора «метеорологические условия»

Приведенные зависимости на рисунках 2.10, 2.11, 2.12, 2.13 отражают совместное воздействие наиболее значимых факторов подсистемы «человек», «ЭММ», «проводимая операция», «окружающая среда» на изменение техногенной опасности электротравмирования, имеющего тенденцию к возрастанию.

Проведем анализ изменения каждого фактора и его влияние на возникновение техногенной опасности электротравмирования при работе с ЭММ.

Уравнение регрессии (2.21) и рисунок 2.10 показывают, что при увеличении значения «внимание, мышление» на 1 услед., показатель возникновения техногенной опасности электротравмирования уменьшается в среднем на 0,052 единицы. Анализ фактора приведен в параграфе 1.3.

Уравнение (2.21) и рисунок 2.11, описывающие связь между фактором «время работы» и показателем возникновения техногенной опасности электротравматизма, позволяют отметить, что с увеличением времени работы на 10 мин. вероятность электротравмирования возрастает (показатель увеличивается на 0,065 единиц). Данный показатель взаимосвязан с другими факторами системы «Ч-ЭММ-ПО-ОС» в целом и в определённой степени, например, фактор «физико-химическое состояние среды» или фактор «состояние изоляции» с увеличением

времени работы происходит быстрый износ изоляции и увеличение степени опасности электротравмирования.

Анализ уравнения связи (2.21) показателя техногенной опасности электротравмирования в зависимости от фактора «организация обеспечения безопасности» и графической зависимости на рисунке 2.12 показывает, что при увеличении значения фактора на 0,1 усл. ед. показатель техногенной опасности электротравмирования снижается на 0,043 единицы. Несмотря на то, что фактор «организация обеспечения безопасности» рассматривается и учитывается в относительных единицах, значение данного фактора будет зависеть от воздействия других факторов подсистемы «проводимая операция» и в целом системы.

Фактор «метеорологические условия» имеет важное значение в обеспечении комфортных условий для человека при эксплуатации ЭММ. Исходя из анализа уравнения (2.21) и рисунка 2.13 видно, что при повышении температуры на 1°C, показатель техногенной опасности электротравмирования уменьшается на 1,6 единиц.

Таким образом, при использовании математических уравнений нелинейной зависимости, с учетом линеаризации, определена степень влияния наиболее значимых факторов на состояние системы «человек – ЭММ – проводимая операция – окружающая среда», получены значения показателей техногенной опасности электротравмирования, с изменением каждого фактора на единицу в зависимости от размерности. Проведенный регрессионный метод позволил оценить взаимовлияние и связь факторов при возникновении электроопасных ситуаций, получить однозначные зависимости. Для определения оценки изменения влияния между факторами, воздействующими на показатель техногенной опасности электротравмирования, применены коэффициенты корреляции и детерминации, которые определены по формулам (2.19), (2.20). Результаты расчетов приведены в таблице 2.6.

Анализ полученных данных таблицы 2.6 показывает, что наиболее практически значимым является коэффициент корреляции  $r_3^0 = 0,85$ . Полученные значения коэффициентов детерминации показывают, что показатель техногенной



опасности электротравмирования на 56% зависит от фактора «вынимание, мышление», на 85% зависит от фактора «время работы», на 55% зависит от фактора «метеорологические условия» и на 91% зависит от фактора «обеспечение безопасности». (Расчет уравнений взаимосвязи факторов, коэффициентов корреляции и детерминации приведены в Приложении А).

Предлагаемая методика, предназначенная для решения задач по оценке безопасности эксплуатации ЭММ, основанная на вероятностном подходе и составлении корреляционных уравнений, с обработкой статистических и экспериментальных данных методом математического анализа, позволяет установить влияние каждого фактора на величину опасности и вредности и выбрать из числа управляемых факторов оптимальные по критерию безопасности. В качестве определяемого критерия, в данной методике, принят показатель техногенной опасности электротравмирования, который дает количественную оценку безопасности состояния системы «Ч-ЭММ-ПО-ОС».

Таблица 2.6 – Результаты расчетов коэффициентов корреляции и детерминации

Коэффициент корреляции	$r_1^Ч$	$r_2^Э$	$r_3^0$	$r_4^S$
Значение	0,75	0,12	0,85	- 0,92
Коэффициент детерминации	$d_1^Ч$	$d_2^Э$	$d_3^0$	$d_4^S$
Значение	0,56	0,013	0,43	0,85

#### 2.4 Сценарное прогнозирование и его оценка развития электротравматизма.

Важное место в решении проводимых исследований техногенной опасности занимает выполнение сценарного прогнозирования и определение его оценки в развитии электротравматизма при работе с ЭММ.

Метод сценарного прогнозирования, дает возможность определить вероятностные тенденции развития событий и возможные последствия принимаемых решений с целью выбора наиболее подходящей альтернативы управления. Метод предусматривает участие в разработке сценариев развития

анализируемой ситуации, специалистов различного профиля и часто с различными взглядами на рассматриваемую проблему. Он включает в себя приемы и методы содержательного и формализованного описания проблемной ситуации и конкретные методы, и алгоритмы построения и исследования сценариев ее развития с широким применением новых информационных технологий [93, 94, 95].

Под сценарием понимается гипотетическая картина последовательного развития и во времени и пространстве событий, представляющих в совокупности эволюцию управляемого объекта в интересующем исследователя разрезе. В сценарии в явном виде фиксируются причинно-следственные зависимости параметров, определяющих возможную динамику изменения состояния объекта, действующие факторы и условия, в которых эти изменения будут происходить. Сценарий является некоторой относительной, условной оценкой возможного развития системы, так как всегда строится в рамках предположений о будущих условиях развития, которые чаще всего принципиально непредсказуемы [96].

Сценарный метод предусматривает многовариантность, т.е. разработку некоторых альтернативных вариантов возможного развития ситуации, рассмотрение которых позволяет определить критические ситуации, а также установить возможные последствия предполагаемых вариантов с целью их сопоставления и выбора наиболее эффективного. Сценарий развития анализируемой ситуации позволяет с тем или иным уровнем достоверности определить тенденции развития, взаимосвязи между действующими факторами, сформировать картину возможных состояний, к которым может прийти ситуация под влиянием тех или иных воздействий. Разработанные сценарии позволяют более полно и отчетливо определить перспективы развития ситуации, как при наличии различных управляющих воздействий, так и при их отсутствии. С другой стороны, сценарии ожидаемого развития ситуации позволяют своевременно осознать опасности, которыми чреваты неудачные управленческие воздействия или неблагоприятное развитие событий [93, 96].

Сценарный метод предполагает составление трех возможных вариантов (сценариев) развития ситуации – оптимистического, наиболее вероятного

«планового» и пессимистического. При выполнении исследований в диссертации применен более приемлемый – второй метод сценарного прогнозирования, а именно, наиболее вероятного.

С другой стороны, состояние электробезопасности, как известно, зависит от многих признаков (факторов), применение которых вызывается многими причинами и обстоятельствами. Поэтому исключается возможность установления жестких однозначных закономерностей между показателями электротравматизма, признаками, характеризующими его и причинами, вызывающими изменение этих признаков. В этом случае задача так называемого вероятного прогнозирования может быть сведена к качественному или количественному анализу влияния признаков на состояние электробезопасности и определению тенденции изменения показателей электротравматизма на перспективу [97, 98].

Рассмотрим эту задачу, предварительно выделив этапы:

1. установления объекта прогнозирования;
2. отбора наиболее значимых признаков, характеризующих объект прогнозирования;
3. определения периода прогнозирования;
4. обоснования метода прогнозирования.

Метод сценарного прогнозирования дает возможность определить вероятные тенденции развития электротравматизма, как следствие возникновения техногенной опасности ЭММ, в зависимости от наиболее значимых признаков и рассматриваемых ситуаций. В сценарии фиксируются причинно-следственные связи, определяющие динамику изменения состояния электротравматизма, при действующих признаках-факторах, и условия, в которых эти изменения происходят.

При отборе признаков, подлежащих прогнозу, будем руководствоваться следующим: необоснованное увеличение числа признаков приводит к сложности анализа и неоднозначности прогнозных оценок. Кроме того, как отмечается в [97], снижается достоверность результатов прогноза. С другой стороны, попытка

оценить объект прогнозирования, скажем по одному или двум признакам может привести к снижению показателей качества (точности, достоверности и полноты).

Правильный и обоснованный отбор признаков, характеризующих электротравматизм, можно провести с помощью известного правила [99], основанного на ранжировании признаков, наряду с известным методом экспертных оценок или может быть получен с помощью проведенного в диссертации частотного анализа. Для этого необходимо в векторе-признаке  $F=(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_i, \dots, \Pi_k)$ , ( $i=1, 55$ ) выделить признаки, имеющие значения  $\Pi_i$ ,  $\Pi_{\max}$ . В соответствии с рисунками 2.1-2.7 этими признаками являются  $\Pi_1$ ,  $\Pi_8$ ,  $\Pi_{10}$ ,  $\Pi_{22}$ ,  $\Pi_{33}$ ,  $\Pi_{48}$ ,  $\Pi_{51}$ .

В таблице 2.7 приведен ранжированный ряд значимых признаков, характеризующих электротравматизм и составляющих объект прогнозирования.

Таблица 2.7 – Ранжированный ряд значимых признаков

ПВ1 возраст (В)	ПС8 стаж (С)	ПД10 дни недели (ДН)	ПТ22 Топографические условия (ТУ)	ПР33 виды работ (ВР)	ПЭ48 виды ЭММ (ВЭ)	ПО51 опасная ситуация (ОС)
0,32	0,28	0,45	0,58	0,67	0,83	0,92

Для определения периода прогнозирования воспользуемся рекомендациями [97], в соответствии с которыми предусмотрены интервалы упреждения: до 5 лет (краткосрочный прогноз) и от 6 до 15 лет (среднесрочный прогноз). Первый вид прогноза следует применять для отдельных электроэнергетических предприятий или в целом таких предприятий, например, республики, области с целью организации оперативной помощи в профилактике травматизма. Среднесрочный прогноз, для отрасли или региона, дает возможность выработать стратегию по рациональному использованию материальных средств и ресурсов, выделяемых на охрану труда.

Для выполнения краткосрочного или среднесрочного прогноза рационально использовать экстраполяционный метод [97], сущность которого состоит в том, что

сложившаяся в предпрогнозный период динамика изменения показателей (признаков) электротравматизма переносится на заданный интервал упреждения. В качестве ретроспективной информации может быть использован временной динамический ряд, отражающий состояние электробезопасности (электротравматизма) при работе с ЭММ.

Сценарий развития электротравматизма являясь некоторой относительной условной оценкой построен исходя из статистических данных по электротравматизму на объектах электроэнергетики Республики Бурятия в период с 2011г. по 2015г. (предпрогнозный период), выявлена тенденция изменения признаков  $\Pi_i$  возникновения электротравм.

Для построение динамического ряда представим уравнение регрессионной зависимости электротравматизма в трехмерном пространстве. Каждому времени  $t_i$  соответствует вполне определенная статистическая кривая  $\varphi_i$ . С помощью статистической кривой по оси времени  $t$  в принципе можно выявить тенденцию изменения каждого признака  $\Pi_i$  ( $i=1,55$ ) в течении 5 лет. Тогда для каждого трёхмерного пространства в координатах  $n-t$  можно получить динамический ряд признака  $\Pi_i$ .

Используя изложенную процедуру, построим динамические ряды для отмеченных выше значимых признаков  $\Pi_{В1}$ ,  $\Pi_{С8}$ ,  $\Pi_{Д10}$ ,  $\Pi_{Т22}$ ,  $\Pi_{Р33}$ ,  $\Pi_{М48}$ ,  $\Pi_{О51}$  (Динамические ряды признаков электротравматизма при эксплуатации ЭММ приведены в Приложении Б). Анализ этих рядов в виде ломанных кривых показывает, что имеется заметное изменение, т.е. увеличение их уровня. Для «выравнивания» рядов воспользуемся способом наименьших квадратов, в результате чего построим кривые  $\varphi(t)$ , характеризующие тенденции изменения динамических рядов. Функция  $\varphi(t)$ , аппроксимирующая динамический ряд признака  $\Pi_i$ , как известно, называется трендом. Экстраполируя полученную закономерность  $\varphi_i(t)$  на последующие 5 лет (вплоть до 2021года), выполним краткосрочный прогноз признаков, наиболее существенно характеризующих электротравматизм при работе с ЭММ. Полученный на интервале упреждения ряд значений признака  $\Pi_i$  составит так называемый параметрический ряд признаков

электротравматизма. Полную совокупность параметрических рядов можно оценивать, как результат многокритериального прогнозирования.

На рисунке 2.14 приведены параметрические ряды многокритериального прогнозирования признаков электротравматизма при эксплуатации ЭММ.

Применение метода сценарного прогнозирования для решения задач электробезопасности обосновывается специфическими свойствами явления электротравматизма, характеризующимися его инерцией (эволюционным характером развития) и кумулятивностью, т.е. способностью монотонно во времени накапливать статистическую информацию [96]. Отметим, что эти свойства могут сохраняться при неизменности условий электробезопасности применения электрических мобильных машин.

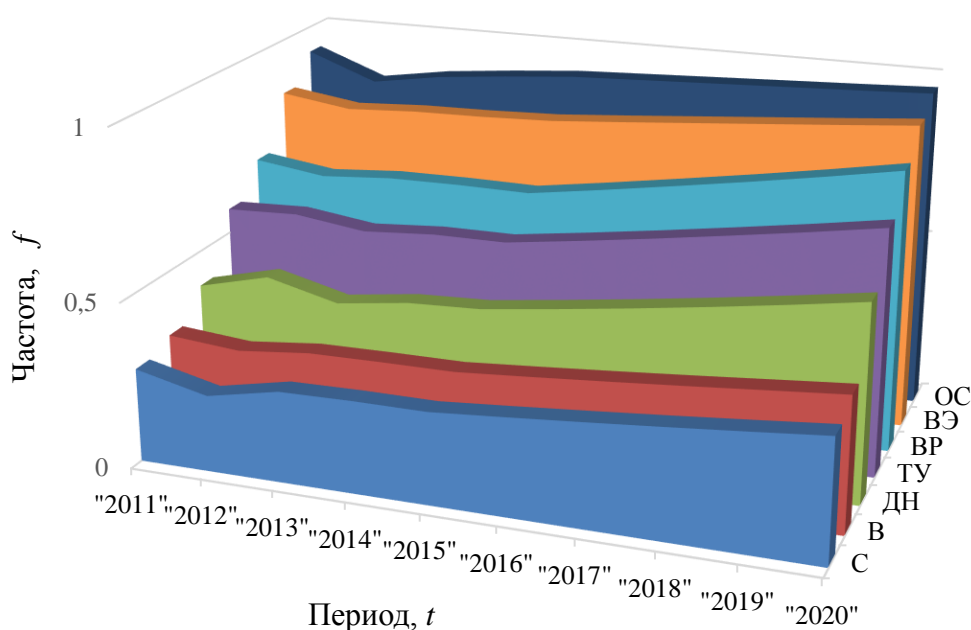


Рисунок 2.14 – Многокритериальное прогнозирование электротравматизма

В соответствии с построенной функцией  $\varphi(t)$ , аппроксимирующей динамический ряд относительного показателя частоты электротравматизма (см. рисунок 2.15) к 2021 году ожидается повышение уровня техногенной опасности ЭММ по сравнению с 2015 г. в 1,36 раза.

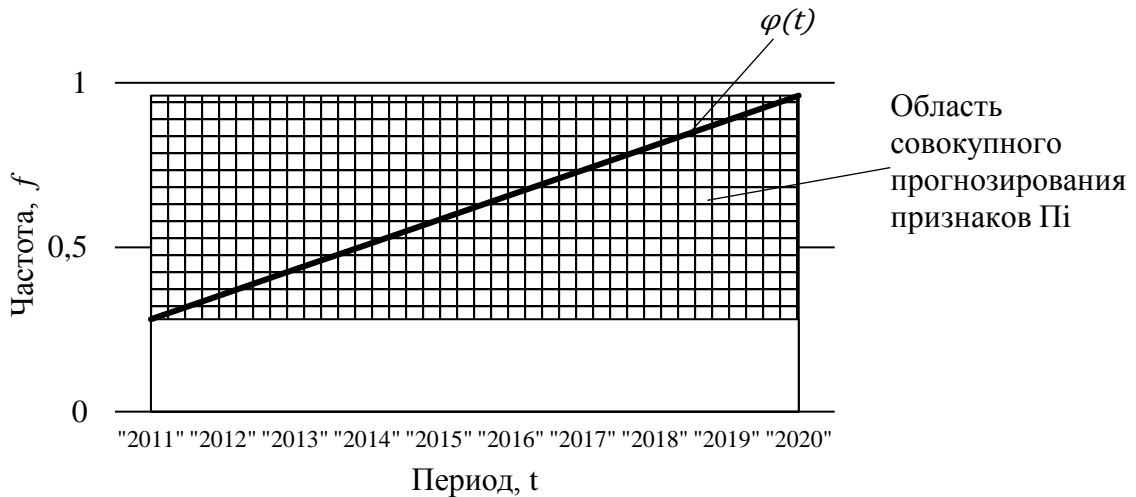


Рисунок 2.15 – Динамика краткосрочного прогноза электротравматизма

Используемый метод экстраполяции признаков электротравматизма обладает достаточной точностью (относительная погрешность не превышает 10%).

## 2.5 Выводы

1. Разработанный в работе частотный метод анализа совокупности признаков, характеризующих электротравму позволяет провести его количественную оценку причинно-следственных связей, выделив из них наиболее значимые, оказывающие существенное влияние на состояние электробезопасности электрических мобильных машин.

2. Разработанная методика интегральной оценки влияния факторов на условия применения ЭММ позволяет выделить из них наиболее главные, оказывающие существенное влияние на уровень электробезопасности и дает возможность определить показатель совокупного воздействия факторов на возникновение электротравматизма.

3. Полученный обобщенный показатель неблагоприятного воздействия факторов, выраженный величиной интегрального балла позволяет определить количественную характеристику значимости единичного показателя каждой подсистемы в системе «Ч-ЭММ-ПО-ОС».

4. С помощью вероятностного метода анализа установлены корреляционные зависимости влияния отдельных факторов на возникновение техногенной опасности развития электротравматизма при работе с ЭММ.

5. Предлагаемая методика по оценке безопасности применения ЭММ, основанная на использовании методов математического анализа позволяет выделить управляемые факторы при их количественном изменении и выбрать оптимальные по показателю техногенной опасности развития электротравматизма.

6. Разработанный метод сценарного прогнозирования уровня техногенной опасности позволяет построить динамику изменения состояния электротравматизма при действующих признаках в условиях использования ЭММ.

7. В результате построения полной совокупности параметрических рядов признаков получена количественная и качественная характеристика, оцениваемая как многокритериальное прогнозирование электротравматизма, показывающее увеличение его в 1,36 раза к 2021 году по отношению к 2011 году.



### **3 АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ ЭММ**

#### **3.1 Подобно-критериальное моделирование системы безопасности электрических мобильных машин**

На современном этапе развития использования электрических мобильных машин в производственных условиях предприятий электроэнергетики обеспечение безопасности связано с совершенствованием применяемых методов организации работ на основе комплексного системного подхода с учетом факторов, оказывающих влияние на процесс эксплуатации ЭММ. Данные факторы человеко-машинной системы, как отмечено выше, приобретает особое значение при создании системы безопасности ЭММ.

Комплексный подход к созданию оптимальной системы безопасности (ОСБ) при работе с ЭММ базируется на следующих основах:

1. Обеспечении электробезопасности – совокупности взаимосвязанных организационно-технических мероприятий и защитных средств, создающих безопасное взаимодействие человека с ЭММ в процессе ее эксплуатации. В свою очередь, система электробезопасности имеет сложную по иерархии структуру и по своим признакам относится к категории больших систем [56].

2. Безопасности ЭММ рассматриваемой системы исходя из результатов интегральной оценки взаимодействия компонентов системы «человек – ЭММ – проводимая операция – окружающая среда – ОСБ». Причем в качестве количественной меры предложено ввести вероятностные характеристики, т.е. под ОСБ ЭММ следует понимать такое состояние «ЭММ», при котором с некоторой вероятностью человеку не угрожает опасность быть электротравмированным [100, 101].

3. Оценке качества функционирования ОСБ, которую следует проводить с помощью показателей технической и экономической эффективности.

В качестве показателей технической эффективности, отражающей степень выполнения поставленной перед ОСБ цели, следует использовать вероятностные характеристики уровня безопасности.

Экономическую эффективность ОСБ необходимо оценивать по так называемому среднегодовому экономическому эффекту, представляющему разность между предотвращенным от электротравматизма ущербом и приведенными затратами, связанными с созданием ОСБ [102].

4. Оптимизации ОСБ – построении технически эффективной и экономически целесообразной системы безопасности эксплуатации ЭММ. Оптимизацию (структурную и параметрическую) целесообразно проводить при заданном показателе технической эффективности путем оптимизации приведенных затрат. Данная система рассматривается как сложное событие, на которое воздействует множество объективных и субъективных факторов. Для разработки системы безопасности при эксплуатации ЭММ используем комплексный метод исследования, включающий: аналитические исследования, методы обобщения и анализа факторов производства, методы математической статистики и моделирования, производственные эксперименты и испытания [103, 104, 105].

Общая методология исследования и совершенствования оптимальной системы безопасности структурно-логическими и математическими методами базируется на рассмотрении следующих аспектов [72, 78]:

- системно-элементном, качественно и количественно характеризующим состав системы;
- системно-структурном, концентрирующим внимание на математических способах связи и организации взаимодействия ее элементов;
- системно-функциональном, учитывающим задачи основных компонентов системы.

Система безопасности рассматривается как сложное понятие, являющееся средством представления объектов и используемое в целях их качественного исследования и совершенствования.

Применяя математические методы анализа ОСБ нужно определить роль подобия и моделирования, их значение в процессе создания системы и выделить то общее, что присуще всем моделям. Это общее заключается в наличии некой структуры, которая подобна, или рассматривается в качестве подобия структуре другой системы. Таким образом, модель – это естественный или искусственный объект, находящийся в соответствии с научным объектом [104]. Моделирование означает осуществление каким-либо способом отображения или воспроизведения действительности для изучения имеющихся в ней объективных закономерностей. Моделирование как познавательный процесс, содержащий переработку информации, дает представление образа, имеющего сходство с соответствующими объектами. Сумма этих образов позволяет выявлять свойства изучаемых объектов и их взаимодействие. Математическая запись, составленная на основании суммы образов и содержащая описание закономерностей, представляет аналоговую математическую модель [106].

Информация о состоянии системы безопасности при изучении методами моделирования должна быть упорядочена. Это осуществляется с помощью теории подобия, позволяющей по заданным характеристикам одного несчастного случая судить о большом количестве несчастных случаев в том или ином смысле подобных первому. Подобие явлений означает, что данные о протекании процессов, полученные при изучении одного явления, можно распространить на все явления, подобные данному. При этом модель обеспечивает подобие только тех процессов, которые удовлетворяют критериям подобия, на основе теории подобия [107].

Исследовательские задачи, которые решаются в данной работе, с помощью модели – это прямые задачи анализа, при решении которых исследуемая система задается параметрами своих элементов и параметрами исходного режима, структурой или уравнением. При этом, необходимо определить реакцию системы на действующие силы. Моделирование осуществляется на основе некоторых математических соотношений, количественно фиксирующих условия подобия – критериев подобия [107].

В процессе эксплуатации ЭММ для устранения возникновения опасной ситуации необходимо выделить основные факторы, влияющие на условия ее применения (см. параграф 1.3), определить взаимодействие и состояние подсистем «безопасность – человек», «безопасность – ЭММ», «безопасность – проводимая операция» «безопасность – окружающая среда». Изначально подсистемы рассматриваются по отдельности, с целью изучения и разработки в критериальной форме количественных составляющих подсистем, критерии состояния и разработки параметров подсистем с выявлением основных наиболее значимых факторов системы «Ч-ЭММ-ПО-ОС», построения обобщенной аналоговой математической модели для поиска критериев подобия в виде критериальных уравнений.

Обобщенная аналоговая математическая модель системы безопасности ЭММ имеет вид:

$$B = f(Ч, Э, О, S), \quad (3.1)$$

где Ч, Э, О, S – подсистемы безопасности, соответственно: Ч – «человек», Э – «ЭММ», О – «проводимая операция», S – «окружающая среда».

В системе «безопасность» зависимость оптимальных условий эксплуатации ЭММ от факторов, влияющих на данную систему, представим в виде функциональной зависимости.

Функциональная зависимость, подлежащая исследованию системы «безопасность», имеет вид:

$$f(B, В, И, t, V, O_3, t^\circ, E) = 0. \quad (3.2)$$

В качестве основных компонентов, влияющих на систему «безопасность», примем к рассмотрению следующие факторы подсистем Ч, Э, О, S:

В – внимание, мышление;

И – состояние изоляции;

$t$  – время работы (ЭММ);

$V$  – механические воздействия(вибрация);

$O_3$  – организация обеспечения безопасности;

$t^\circ$  – метеорологические условия(температура);

$E$  – освещенность рабочего места.

Проводимый далее анализ базируется на применении  $\pi$ -теоремы [107], которая позволяет произвести замену переменных размерных величин  $m$ , сократив их число безразмерными величинами до  $n-k$ , и тем самым перейти к записи уравнений модели системы «безопасность» в критериальной форме. При этом упрощается обработка исследований, так как связи между безразмерными величинами  $\pi$ -критериями подобия, выполняются проще, а именно переход к безразмерным соотношениям позволяет перенести результаты исследования на ряд подобных явлений. Значения критериев  $\pi$  являются одинаковыми для любого количества подобных процессов.

Для определения критериев с помощью  $\pi$ -теоремы необходимо [107]:

- выявление  $m$  параметров, которые характеризуют изучаемый процесс;
- составление матрицы размерностей  $m$  параметров;
- установление числа  $k$  независимых между собой параметров;
- составление выражений  $m-k$  критериев подобия.

В системе единиц (СИ) запишем уравнения величин факторов для их основных размерностей (кроме  $V$  и  $O_3$  – измеряемых в относительных единицах), при этом масштабами модели являются значения длины  $L$ , массы  $M$ , времени  $T$ .

$$\begin{aligned}
 [B] &= [M]^0 [L]^0 [T]^0; & [V] &= [M]^{-1} [L]^0 [T]^0 \\
 [И] &= [M]^0 [L] [T]^{-1}; & [t^\circ] &= [M]^0 [L]^3 [T]^{-2}; \\
 [t] &= [M]^0 [L]^0 [T]; & [E] &= [M] [L] [T]^{-2}. \\
 [Б] &= [M] [L] [T]; & &
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

Применим в качестве независимых величин следующие:  $t$ ,  $E$  и  $t^\circ$ . Правильность выбора подтверждается составлением матрицы размерностей выбранных параметров:

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \\ 0 & 3 & -2 \end{bmatrix} = 3, \quad (3.4)$$

т.е.  $D \neq 0$ , следовательно, величины  $t$ ,  $E$  и  $t^\circ$  действительно независимы.

Согласно  $\pi$ -теоремы, уравнение записанное в критериальной форме должно быть безразмерным. Поэтому его составляющие представим в виде:

$$B = (t)^x (E)^y (t^\circ)^z; \quad (3.5)$$

$$И = (t)^{x_1} (E)^{y_1} (t^\circ)^{z_1}; \quad (3.6)$$

$$V = (t)^{x_2} (E)^{y_2} (t^\circ)^{z_2}. \quad (3.7)$$

Фактор В (внимание, мышление) и фактор  $O_3$  (обеспечение безопасности) не имеет основных размерностей, принятых в вычислениях, поэтому примем их как самостоятельный критерий  $\pi_1$  – операционной напряженности.

Зависимость системы «безопасность» от переменных факторов запишем в следующем виде:

$$\frac{B}{(t)^x (E)^y (t^\circ)^z} = f \left( \frac{И}{(t)^{x_1} (E)^{y_1} (t^\circ)^{z_1}}, \frac{V}{(t)^{x_2} (E)^{y_2} (t^\circ)^{z_2}}, \pi_1 \right), \quad (3.8)$$

где  $x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2$  – неизвестные показатели степеней переменных факторов.

$$\frac{И}{(t)^{x_1} (V)^{y_1} (t^\circ)^{z_1}} = \frac{[M]^0 [L] [T]^{-1}}{[T]^{x_1} [M]^{y_1} [L]^{y_1} [T]^{-2y_1} [L]^{3z_1} [T]^{-2z_1}}. \quad (3.9)$$

Приравнивая показатели степеней одноименных величин, стоящих в числителе и знаменателе, получим:

$$\text{для } [M]: 1 = y_1;$$

$$\text{для } [L]: 1 = y_1 + 3z_1;$$

$$\text{для } [T]: -3 = x_1 - 2y_1 - 3z_1;$$

$$\text{т.е. } x_1 = 0; y_1 = 1; z_1 = -1.$$

$$\frac{V}{(t)^{x_2}(E)^{y_2}(t^0)^{z_2}} = \frac{[M]^{-1}[L]^0[T]^0}{[M]^{x_2}[L]^{x_2}[T]^{2x_2}[L]^{y_2}[T]^{2y_2}[T]^{z_2}}. \quad (3.10)$$

Приравнивая показатели степеней одноименных величин, стоящих в числителе и знаменателе, получим:

$$\text{для } [M]: 0 = x_2;$$

$$\text{для } [L]: 0 = -x_2 + y_2;$$

$$\text{для } [T]: -1 = -2x_2 - 2y_2 + z_2;$$

$$\text{т.е. } x_2 = -1; y_2 = 0; z_2 = 0.$$

После выделения критерия функциональной надежности –  $\pi_2$ , отражающего сопротивление изоляции ЭММ, критерий интенсивности нагрузки –  $\pi_3$ , зависящий от уровня механических воздействий и времени работы ЭММ, будет иметь следующее выражение:

$$\pi_3 = \frac{V}{t^{-1}} \text{ или } \pi_3 = V \cdot t. \quad (3.11)$$

Факторы, являющиеся источниками техногенной опасности, выражаются через критерий операционной напряженности –  $\pi_1$  и критерий функциональной надежности –  $\pi_2$ .

Тогда критерии  $\pi_1$  и  $\pi_2$  будут иметь следующие выражения:

$$\pi_1 = B, O_3. \quad (3.12)$$

$$\pi_2 = \frac{И}{(t)^0 \cdot E \cdot (t^0)^{-1}} \text{ или } \pi_2 = \frac{И \cdot t^0}{E}. \quad (3.13)$$

Выделим критерий  $t^0$  (метеорологические условия) в самостоятельный критерий – метеорологических условий ( $\pi_4$ ), значит  $\pi_2 = \frac{И}{E}$ .

Тогда выражение (3.1) запишем в критериальной форме:

$$\pi_B = f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4). \quad (3.14)$$

На основе теории подобия установлены закономерности состояния системы безопасности в зависимости от факторов и получены критерии подобия, характеризующие состояние системы:

– критерий  $\pi_1$  – операционной напряженности, зависящий непосредственно от психологических особенностей организма человека, (внутренние факторы), т.е. решений, действий, поведения человека и организационно-технических факторов безопасности;

– критерий  $\pi_2$  – функциональной надежности, учитывает безотказность технического состояния изоляции ЭММ и освещенность рабочего места;

– критерий  $\pi_3$  – энергетической нагрузки, учитывающий уровень механических воздействий и время работы ЭММ;

– критерий  $\pi_4$  – метеорологических условий, учитывает температуру окружающей среды и возможность неблагоприятных воздействий среды (топографические условия в период использования электрической мобильной машины).

Проведенный анализ показывает, что физический процесс математически отражается функцией  $m-k$  безразмерных соотношений – критериев подобия  $\pi$ . Уравнение, дающее связь между  $m$  участвующими факторами, представленное в критериальной форме (3.14), позволяет выразить его как функцию  $m-k-l$  критериев подобия.



Соотношение вида:

$$B_0 = f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{m-k}), \quad (3.15)$$

представляет математическую формулировку  $\pi$ -теоремы и называется критериальным уравнением. Оно показывает, что один из  $m-k$  критериев подобия является функцией остальных  $m-k-1$  критериев. Таким образом, число величин определяющих безопасность эксплуатации ЭММ при критериальной форме записи, уменьшается на  $k-1$ , тогда независимых критериев остается  $m-k-1$ .

Полученные критерии подобия, на основе теории подобия, являются показателями системы безопасности ЭММ, которые являются одинаковыми для любого количества подобных условий. Для принятия решений при управлении процессом повышения безопасности необходимо использовать критерии подобия, т.е. математические выражения, дающие количественную оценку соответствия определенным требованиям.

### **3.2 Моделирование формализованного процесса возникновения элеутроопасных ситуаций в системе обеспечения безопасности**

Известно, что модель – это такой материальный или мысленно представленный объект, который в процессе познания (изучения) замещает объект-оригинал, сохраняя некоторые его важные для данного исследования типичные черты. Моделирование процесс построения и использования модели [104].

Модели и моделирование обладают определенными признаками и свойствами, которые необходимы для того, чтобы: понять, как устроен конкретный объект-оригинал; каковы его структура, основные свойства, закономерности функционирования и развития; научиться управлять объектом в процессе его функционирования, в том числе, определять наилучшие для него управляющие воздействия при заданных целях и критериях; прогнозировать прямые и косвенные

последствия реализации конкретных способов и форм воздействия на моделируемый объект [106].

Модель конструируется объектом исследования так, чтобы отобразить характеристики объекта – свойства, взаимосвязи, структурные и функциональные параметры, существенные для цели исследования. Содержание моделирования составляют модели на основе предварительного изучения исследования и выделения его существенных характеристик, теоретический анализ модели, сопоставление результатов с данными об объекте [57].

При анализе состояния электробезопасности при эксплуатации ЭММ используются математические модели, описывающие изучаемый процесс с помощью уравнений, неравенств, функций и других математических свойств.

Создание системы безопасности имеет сложную структуру, т.к. в процессе эксплуатации ЭММ занят человек с характерными психофизиологическими особенностями, применяются технические средства электрозащиты с определенными параметрами, окружающая среда с изменяющимися параметрами температуры, влажности воздуха и т.д., от которых зависит безопасное состояние системы, возникает необходимость упрощения изучаемого объекта. При этом степень упрощения такова, что все существенные для данного исследуемого объекта свойства в соответствии с целью исследования отражены в модели.

Важным этапом моделирования является определение конечной цели – построение модели состояния безопасности объекта исследования, а также определение критериев подобия, по которым будут сравниваться различные варианты решения. На основе анализа уравнений, используя  $\pi$ -теорему, установлены условия подобия и закономерность моделирования. А также, используя  $\pi$ -теорему, которая является основой анализа размерностей, показано, что результаты любого физического эксперимента составляют некоторые безразмерные комбинации величин, участвующие в изучаемом процессе. Соотношения и функциональные зависимости, характеризующие процесс и представленные в виде безразмерных  $\pi$ -величин – критериев подобия, справедливы

не только для данного процесса, но и для всех процессов, имеющих численно такие критерии подобия [107].

Одним из этапов моделирования процесса безопасного состояния системы является выбор наиболее рационального метода для решения задач. Поскольку, обеспечение условий безопасности применяется в различных технологических процессах при использовании разных видов ЭММ, поэтому при исследовании этой проблемы существенным является обобщенный системный подход с применением теории подобия и моделирования.

Не менее важным этапом моделирования является всесторонний анализ результатов. Окончательным критерием достоверности модели является: практика, соответствие полученных результатов и выводов реальным условиям производства [78].

Моделирование системы основывается на следующих критериях выделения факторов как элементов факторной системы: причинности, достаточной специфичности, самостоятельности существования, учетной возможности. С формальной точки зрения факторы, включаемые в данную систему, должны быть количественно измеренными. Модель должна быть адекватной действительности, отражать существенные стороны и связи изучаемого объекта [104].

В современных условиях экономического развития, на предприятиях каких-либо структур, также на объектах электроэнергетики, отсутствует методология по оценке состояния безопасности, применяется упрощенная формализация при решении задач по обеспечению безопасности труда, предупреждению несчастных случаев и возникновению электротравматизма людей [108].

При разработке мероприятий, по предупреждению вероятности возникновения травмоопасных ситуаций, возникают задачи отыскания оптимальных решений экономики, целенаправленного планирования и финансирования мероприятий по снижению уровней опасных факторов [109].

В параграфе 1.2 выполнен анализ основных опасных ситуаций и рассмотрены организационные и технические причины возникновения электротравматизма при работе с ЭММ.

Обычно травмоопасной называют такую ситуацию, возникающую при обслуживании ЭММ, в которой человек попадает под напряжение, вследствие чего по его телу протекает электрический ток опасной величины. Как уже указывалось опасной ситуации может предшествовать как повреждение изоляции или авария ЭММ, так и нарушение правил техники безопасности человеком.

Рассматривая во взаимосвязи систему «человек – ЭММ – проводимая операция – окружающая среда», следует отметить, что электроопасная ситуация возникает при нарушении этой взаимосвязи и является прямым её следствием. Поэтому, для устранения возникновения электроопасных ситуаций, необходимо выявить специфические имманентные свойства компонентов (подсистем) системы, формирующие в той или иной мере опасную ситуацию и влияющие на исход электропоражения [110].

Взаимодействие составляющих в пространстве и во времени (параграф 1.3, рисунок 1.6) может приводить модель «человек – ЭММ – проводимая операция – окружающая среда» к одному из состояний [111, 112, 113]:

- безопасное;
- предаварийное;
- опасное;
- послеаварийное.

Первое состояние не создаёт никаких опасностей человеку. Второе состояние, обусловленное наличием скрытых дефектов ЭММ, её повреждениями, пробоем электрической изоляции в сети и т.д., формирует опасную ситуацию, создаёт реальную угрозу здоровью и жизни человека. По истечении определённого времени второе состояние может перейти в третье (например, в случае прикосновения к металлической части корпуса ЭММ, оказавшегося под напряжением в результате повреждения изоляции). Нередко третье состояние модели может возникнуть в результате неправильных действий человека, вызванных нарушениями правил техники безопасности и инструкций по эксплуатации ЭММ и оборудования. В этом случае опасная ситуация сопровождается электротравмой, исход которой будет определяться величиной

тока, протекающего через тело человека, длительностью его воздействия, а также физиологическими особенностями пострадавшего, учитывающими пол, возраст, болезнь, алкогольное опьянение и др. [109].

На рисунке 3.1 приведена семантическая модель развития опасной ситуации при эксплуатации ЭММ, в которой выделены её дискретные состояния.

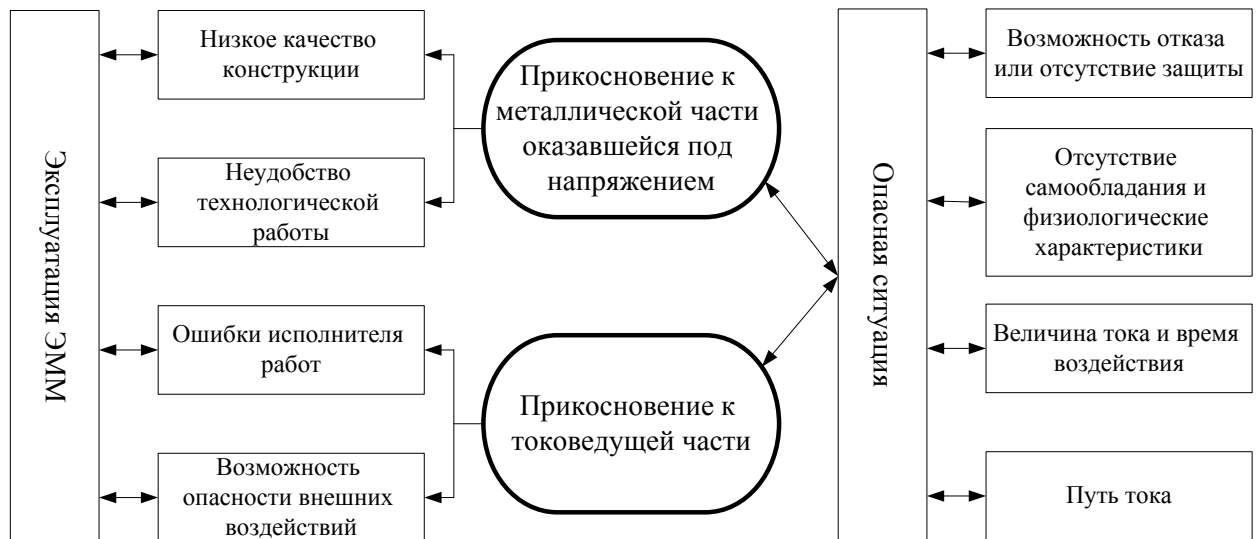


Рисунок 3.1 – Семантическая модель развития опасной ситуации при эксплуатации ЭММ.

Анализ возникновения опасной ситуации необходим для выполнения профилактических мероприятий, то есть обеспечения безопасной деятельности человека. Системный подход к решению проблемы, позволяет рассматривать деятельность человека в процессе выполняемых работ с применением ЭММ как сложную социально-техническую систему с заданной структурой, назначением и условиями функционирования. Данный подход требует установления основных взаимосвязей между элементами, то есть компонентами системы; выявления роли каждого из них в общем процессе функционирования системы, учёта всех аспектов, определяющих безопасность. Использование системного подхода позволяет объективно описать процесс безопасного функционирования системы как органически целого [53, 56]

Решение проблемы обеспечения безопасности при эксплуатации ЭММ с применением подобия и моделирования дает возможность принимать наиболее правильные варианты.

Полученные критерии подобия в системе «безопасность» позволяют систематизировать, обобщить закономерно формализовать оценку состояния безопасности при эксплуатации ЭММ, определить закономерности в виде математической модели, позволяющие расширить эмпирические исследования и перейти к количественной оценке.

На основании полученных в параграфе 3.1 критериев подобия построим математическую модель, системы «безопасность» при использовании ЭММ, зависимости возникновения электроопасных ситуаций от факторов, характеризующих эту систему. Данную модель представим в виде уравнения в критериальной форме. Исследуемая зависимость имеет вид:

$$\text{ЭТ} = f(\pi_{\text{ч}}, \pi_{\text{э}}, \pi_0, \pi_{\text{с}}). \quad (3.16)$$

Будем рассматривать критерии подобия, включающие значимые факторы, полученные в параграфе 3.1. В подсистеме «человек» и подсистеме «проводимая операция» это критерий  $\pi_1$  – операционной напряженности, который записан в виде  $\pi_1 = V, O_3$ ; в подсистеме «ЭММ» – критерий  $\pi_2$  – функциональной надежности, который соответствует выражению:  $\pi_2 = \frac{И}{E}$  и критерий  $\pi_3$  – энергетической нагрузки ЭММ, соответственно определяемый из выражения:  $\pi_3 = V \cdot t$ . В подсистеме «окружающая среда» - критерий  $\pi_4$  – метеорологических условий, соответствующий выражению  $\pi_4 = t^\circ$ . Критерии подобия могут преобразовываться в критерии другой формы, получаемые за счет операций перемножения или деления критериев, возведения в степень или умножения на любой постоянный коэффициент [107].

Используя это важное свойство критериев подобия, получаем критерий подобия подсистемы «человек» в виде:

$$\pi_{\text{ч}} = V, \quad (3.17)$$

критерий подобия в подсистеме «ЭММ»:

$$\pi_{\text{Э}} = \frac{I \cdot V \cdot t}{E}, \quad (3.18)$$

критерий подобия в подсистеме «проводимая операция»:

$$\pi_0 = 0_3, \quad (3.19)$$

критерий подобия в подсистеме «окружающая среда»:

$$\pi_S = t^\circ. \quad (3.20)$$

Расчет модели регрессионной зависимости формализованного процесса возникновения опасных ситуаций, приводящих к электротравматизму, выполнен в соответствии с методикой рассмотренной в [106], приведен в Приложении В.

В результате выполненных математических расчётов, полученная модель имеет вид:

$$\text{ЭТ} = -53,25 - 0,21 \cdot \pi_{\text{ч}} + 0,02 \cdot \pi_{\text{Э}} + 0,01 \cdot \pi_0 + 1,19 \cdot \pi_S. \quad (3.21)$$

Основными принципами обеспечения безопасности при эксплуатации ЭММ являются условия, при которых не возникают те или иные опасные ситуации. При теоретических исследованиях и решении задачи по обеспечению безопасных условий работы ЭММ в модели принята процедура идеализации, заключающаяся в выборе факторов и получении критериев в допустимых пределах. Применительно к системе безопасности ЭММ, критерии подобия являются расчетными показателями, а также, показателями, отражающими нормальные и безопасные условия применения ЭММ.

В таблице 3.1 приведены фактические и нормируемые значения наиболее значимых факторов подсистем и вычисленные по уравнениям (3.17-3.20) критерии подобия.

Таблица 3.1 – Значение факторов и критериев подобия

Значения факторов	<i>B</i>	<i>I</i>	<i>t</i>	<i>V</i>	<i>E</i>	<i>t</i> <sup>o</sup>	$\pi_{\text{ч}}$	$\pi_{\text{э}}$	$\pi_{\text{O}}$	$\pi_{\text{S}}$
Фактические	15	4,5	216	135	135	12,8	15	4044,2	0,98	12,8
Нормируемые	12	5	210	150	150	15	12	1002,8	1	15

Подставив найденные значения критериев подобия в уравнение (3.21), получим модель процесса возникновения электроопасной ситуации при эксплуатации ЭММ. Величина развития электроопасных ситуаций, приводящих к возникновению электротравм, составляет: при фактических значениях факторов – 0,41; при нормируемых значениях факторов – 0,02.

На основании анализа регрессионной модели возникновения опасных ситуаций, приводящих к электротравматизму, установлено, что наибольшее количество таких ситуаций появляется из-за факторов подсистемы «ЭММ» – 60,90%, влияние факторов подсистемы «человек» на возникновение электротравматизма составляет 13,45%, подсистемы «проводимая операция» – 10,40%, подсистемы «окружающая среда» – 15,25%.

### 3.3 Оценка уровня электробезопасности электрических мобильных машин

Безопасность применения ЭММ будем рассматривать как состояние системы, при котором не возникает опасности нанесения ущерба здоровью человека, способность сохранять безопасное состояние при выполнении заданных функций в определенных условиях в течении установленного времени. Электробезопасность – это степень опасности или безопасности человека [11].

Исходя из двойственного характера явления электротравматизма, отмеченного выше, дадим оценку уровня электробезопасности в детерминированном и вероятностном видах.

Детерминированная оценка сводится к традиционному анализу статистических данных и состоит в расчете относительных показателей – коэффициентов частоты и тяжести электротравматизма [8].



В таблице 3.2 приведены результаты расчетов демографической и энергетической частот электротравматизма и соответствующих их коэффициентов прироста, а также показатель, характеризующий долю смертельных исходов от общего количества электропоражений. В таблице приняты следующие условные обозначения:

ЭП – среднегодовое количество электротравм при эксплуатации ЭММ;

N – количество людей в определенном множестве;

ЭП<sub>i</sub> – количество электротравм за *i*-ый год;

ЭП<sub>*i-1*</sub> – количество электротравм в предыдущий год;

M – годовое количество используемых ЭММ, по которым проводится анализ электротравматизма;

L – количество электропоражений со смертельным исходом.

Из анализа таблицы 3.2 следует, что показатели демографической и энергетической частот при незначительных их колебаниях по годам имеют тенденцию возрастания (средние значения K<sub>д</sub> и K<sub>е</sub> больше единицы). Показатель летальности K<sub>л</sub> стабилен и остается достаточно высоким, что объясняется специфическими условиями эксплуатации ЭММ.

Таблица 3.2 – Детерминированные показатели электротравматизма, возникающего при эксплуатации ЭММ на объектах электроэнергетики Республики Бурятия за период 2006-2015гг.

№ п/п	Показатели	Годы					Среднее значение за 10 лет
		2006 2011	2007 2012	2008 2013	2009 2014	2010 2015	
1	Частота электротравматизма демографическая $Ч_д = \frac{ЭП}{N} \cdot 10^{-6}$	20,9	18,9	16,9	27,9	25,6	19,8
2	Коэффициент прироста $K_д = \frac{ЭП_i}{ЭП_{i-1}}$	-	0,91	0,92	1,76	0,85	-

## Продолжение таблицы 3.2

3	Частота электротравматизма энергетическая $\chi_E = \frac{\text{ЭП}}{M} \cdot 10^{-6}$	19,5	20,6	23,8	28,3	25,9	23,86
4	Коэффициент прироста $K_E = \frac{\text{ЭП}_i}{\text{ЭП}_{i-1}}$	-	1,06	1,11	1,04	1,1	-
5	Показатель летальности $K_L = \frac{L}{M} \cdot 10^{-6} \cdot 100\%$	41	35	42	44	41	41

Представим это событие в виде суммы двух несовместных событий:

$$\text{ЭП} = \text{ЭП}_1 + \text{ЭП}_2, \quad (3.22)$$

где  $\text{ЭП}_1$  – электропоражение, которое произошло в результате прикосновения к металлическим частям ЭММ, оказавшимся под напряжением в результате пробоя электрической изоляции;

$\text{ЭП}_2$  – то же из-за прикосновения к токоведущим частям, нормально находящимся под напряжением (попадание под фазное напряжение  $U_\phi$ ).

Условно примем допущение, что человек может погибнуть только при возникновении одного из двух событий  $\text{ЭП}_1$  и  $\text{ЭП}_2$ .

В такой ситуации событие  $\text{ЭП}_1$  произойдет при одновременном совпадении следующих событий:

$A_I$  – пробой изоляции и появление на корпусе ЭММ электрического потенциала;

$B_I$  – прикосновение человека к металлической части ЭММ, оказавшейся под напряжением или попадание под напряжение прикосновения, т.е. возникновения опасной ситуации;

$C_1$  – условное электропоражение человека, определяемое значением тока  $I_h$ , протекающего по телу, при длительности воздействия  $t_{\text{возд}}$ , которое вызовет смертельный исход.

Тогда в соответствии с [92], вероятность электропоражения человека следует рассматривать как произведение вероятностей отдельных элементов событий:

$$\text{ЭП}_1 = A_1 \cdot B_1 \cdot C_1, \quad (3.23)$$

или:

$$P(\text{ЭП}_1) = P(A_1) \cdot P(B_1) \cdot P(C_1), \quad (3.24)$$

где  $P(\text{ЭП}_1)$ ,  $P(A_1)$ ,  $P(B_1)$ ,  $P(C_1)$  – вероятности соответственно событий  $\text{ЭП}_1$ ,  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $C_1$ .

Событие  $\text{ЭП}_2$ , происходящее в нормальных эксплуатационных условиях работы ЭММ возможно в случае попадания человека под напряжение прикосновения ( $B_2$ ) и протекании при этом тока по телу, превышающего предельно допустимое значение [8].

Следовательно, событие  $\text{ЭП}_2$  может быть представлено как

$$\text{ЭП}_2 = B_2 \cdot C_2, \quad (3.25)$$

где  $C_2$  – то же, что и  $C_1$

или:

$$P(\text{ЭП}_2) = P(B_2) \cdot P(C_2). \quad (3.26)$$

Полная вероятность электропоражения человека при эксплуатации ЭММ определяется выражением:

$$P(\text{ЭП}) = P(A_1) \cdot P(B_1) \cdot P(C_1) + P(B_2) \cdot P(C_2). \quad (3.27)$$

Выражение (3.27) справедливо при допущениях:

1. Электропоражение может произойти в результате однополюсных прикосновений к токоведущим частям ЭММ или к корпусу, оказавшемуся под напряжением в результате электрического пробоя изоляции.

2. Повреждение изоляции питающего кабеля ЭММ и прикосновение человека к поврежденному кабелю.

3. Причиной электропоражения является фибрилляция сердца.

В Приложении Г приведен расчет вероятностей электропоражения человека, в соответствии с которым  $P(\text{ЭП}) = 13,32 \cdot 10^{-6}$ . Полученное значение  $P(\text{ЭП})$  превышает рекомендуемую норму уровня электробезопасности [114], равную  $1 \dots 3 \cdot 10^{-6}$ , более чем в 4 раза.

Оценка уровня электробезопасности при эксплуатации ЭММ проведена исходя из анализа статистики электротравматизма на предприятиях электроэнергетики Республики Бурятия за период 2006-2015 гг., рассмотренного в параграфе 1.2.

Рассматривая электротравматизм как некоторое сложное многокритериальное явление, были выделены две закономерности, характеризующие это явление: детерминированная и вероятностная. Действительно, как было выше показано, изучение динамики электротравматизма позволило установить достаточно тесную зависимость между увеличением используемых ЭММ и ростом показателя энергетической частоты электротравматизма.

Однако следует отметить, что повышение эффективности обеспечения электробезопасности использования ЭММ может привести к существенному снижению показателя  $P(\text{ЭП})$ . Так, согласно некоторым отечественным и зарубежным исследованиям [14, 56, 115, 116, 117, 118] массовое применение средств электрозащиты, в том числе устройств защитного отключения позволяет снизить уровень электротравматизма в 9-12 раз.

### **3.4 Принципы программно-целевого управления обеспечением безопасности**

На стадии бурного развития применения электротехники в производственном процессе отдельные мероприятия по улучшению условий

безопасности оказываются недостаточно эффективными. Необходимо, чтобы они осуществлялись комплексно, образуя упорядоченную систему безопасности с управляемыми подсистемами. При этом создаются наиболее широкие возможности формирования безопасных условий эксплуатации электроустановок, в т.ч. ЭММ на электроэнергетических объектах [119, 120, 121]. В условиях действующего производственного процесса необходимо учитывать возможности человека, управляющего электроустановками, в частности, ЭММ, и технологическими процессами – проводимой операцией, а также состоянием окружающей среды в комплексе с техническими средствами обеспечения безопасности [57].

Сущность программно-целевого подхода к управлению обеспечением безопасности рассматриваемых процессов и структурой соответствующих мероприятий подтверждает приверженность принятым представлениям о природе опасности и вытекающим из них положениям. Это позволяет сохранить принятую логику изложения материала, обосновать наиболее приемлемые методы и проиллюстрировать их работоспособность на примере решения конкретных задач управления процессом предупреждения техногенных происшествий [119].

На основе программно-целевого управления осуществляется комплекс взаимосвязанных организационных, технических и социально-экономических мероприятий, для безопасного выполнения различных видов работ с ЭММ на предприятиях электроэнергетики.

В целом же внедрение программно-целевого подхода в практику обеспечения и совершенствования безопасности электроустановок может быть разделено на два таких взаимосвязанных этапа [57]:

1. стратегическое планирование – с целью выработки общей идеологии и программы обеспечения безопасности конкретных процессов при эксплуатации электроустановок;

2. управление безопасностью электроустановок – для создания условий, максимально соответствующих выполнению такой программы.

Специфичность рассматриваемой проблемы определяется объективной сложностью обеспечения безопасности электроустановок, обусловленной

наличием в ее составе нескольких, самих по себе сложных и взаимосвязанных компонентов, целенаправленностью или стохастичностью поведения отдельных из них [100, 122]. Такой компонент, как ЭММ, может изменяться неожиданным образом вследствие случайных воздействий окружающей среды, чрезвычайной нестабильностью собственных параметров.

Основной особенностью возникновения несчастных случаев и опасных ситуаций в системе взаимодействия человека и ЭММ, как было отмечено ранее, является многообразие и случайный характер отдельных предпосылок. Следовательно, для своевременного выявления и устранения их негативной части требуется планомерная и целенаправленная работа. Безопасность системы обеспечивается свойствами отдельных компонентов, что требует большого числа мероприятий по созданию их взаимной совместимости [72, 103].

В исследовательских работах [56, 123] отмечено, что при обслуживании электроустановок важное значение имеет состояние управления системой обеспечения безопасности (СОБ), представляющей совокупность взаимосвязанных мероприятий, осуществляемых в целях установления, обеспечения, контроля и поддержания требуемого уровня функционирования соответствующих подсистем, таких как:

- информационной, обеспечивающей сбор, хранение, обработку и анализ сведений об электротравмах;
- защитных способов и средств (заземление, зануление, выравнивание электрических потенциалов, устройств защитного отключения и др.);
- эксплуатационного контроля параметров электроустановок (ЭММ), влияющих на уровень электробезопасности;
- организационных мероприятий, направленных на предотвращение попадания людей под напряжение при эксплуатации электроустановок (ЭММ);
- планирование мероприятий безопасности обслуживания электроустановок;
- стандартов, правил, норм и руководящих документов по вопросам электробезопасности.

Как указано в [123] функционирование подсистем осуществляется под контролем службы охраны труда.

Структура управления безопасностью электроустановок (ЭММ) приведена на рисунке 3.2.

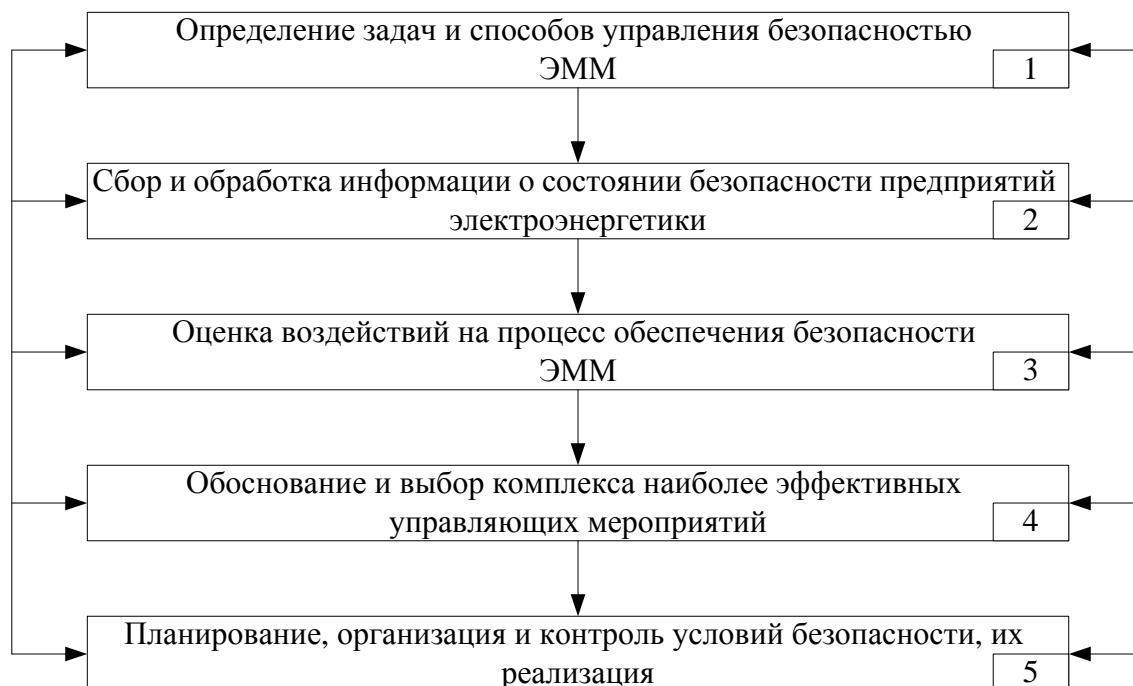


Рисунок 3.2 – Структура управления безопасностью электроустановок (ЭММ)

При разработке системы обеспечения безопасности каждый входящий в нее элемент характеризуется своим качеством, а при взаимосвязи с другими приобретает совершенно новое свойство. Поэтому организация обеспечения безопасности должна включать создание или приведение всей системы в состояние упорядоченности и единства взаимодействия ее элементов (рисунок. 3.3).

Основные задачи СОБ включают: обеспечение высокого уровня безопасности эксплуатации ЭММ на различных стадиях выполняемых работ, предупреждение производственного электротравматизма, снижение, трудовых и материальных потерь, улучшение, на этой основе, эффективности использования ЭММ. Кроме того, задачами системы являются: повышение производительности труда на основе создания безопасных и здоровых условий при работе с ЭММ,

обеспечение системного подхода к решению частных вопросов техники безопасности, а также соблюдение законов об охране труда, норм и правил техники безопасности [29, 53, 124].



Рисунок 3.3 – Схема взаимосвязи задач системы обеспечения безопасности ЭММ

Объектом исследования при разработке СОБ является определение возникновения травмоопасных ситуаций и электротравмирования человека при работе с ЭММ в различных условиях эксплуатации и на различных объектах электроэнергетики.

При выявлении основных причин несоблюдения требований техники безопасности и определении объективных и субъективных факторов, следует выбрать направление, которое с наименьшими затратами материальных средств, времени коллективных усилий приведет к ожидаемому результату [53].



На основе системы функций классического управления [71]: анализ, оценка – планирование – организация – контроль – мотивация (стимулирование) образуются управленческие инструменты, позволяющие наиболее эффективно реализовать мероприятия по вопросам обеспечения безопасности.

Применительно к решению задач по электробезопасности, указанные функции отличаются специфическим содержанием управленческих решений, каждое из которых позволяет выполнить определенные задачи [123]. Анализ и оценка условий эксплуатации электроустановок – ключевая функция управления в системе обеспечения безопасности электроустановок, в том числе ЭММ, реализация которой позволяет определить: фактическое состояние условий применения ЭММ; уровень соответствия нормативным требованиям безопасности процесса работы ЭММ; степень опасности электротравмирования людей; вероятность возникновения опасной ситуации. Важное место в СОБ имеет оценка состояния безопасности применения ЭММ в виде основных критериев:  $\pi_1$  – операционной напряженности;  $\pi_2$  – функциональной надежности;  $\pi_3$  – энергетической нагрузки;  $\pi_4$  – метеорологических условий, значения которых позволяют наиболее эффективно разрабатывать мероприятия по предупреждению электротравматизма, целенаправленно финансировать мероприятия по охране труда. Эффективность системы безопасности определяется количественной оценкой критериев, выраженных математической моделью и полученными численными показателями, характеризующими требуемый уровень безопасности ЭММ.

Управленческую функцию безопасности следует рассматривать как составляющую часть системы обеспечения безопасности. Безопасность как функциональное свойство системы, определяется не только качеством отдельных компонентов, но и характером их взаимодействия с окружающей средой. Это предполагает необходимость в управлении условиями ее формирования, т.е. в планомерном целенаправленном осуществлении комплекса соответствующих мероприятий. Для разработки СОБ использован программно-целевой подход, применяющийся на объектах экономики, в том числе и в электроэнергетике, как в

нашей стране, так и в зарубежных странах [8, 119, 120, 121, 125]. Действующие системы безопасности на предприятиях электроэнергетики имеют недостатки. К таким недостаткам, в части управленческой функции, относятся: отсутствие системного учета человеческих, машинных факторов и факторов окружающей среды; отсутствие анализа причинно-следственных связей между безопасностью и факторами условий эксплуатации электроустановок; не разработаны критерии для оценки и анализа системы. Данные недостатки не позволяют принимать эффективные решения и мероприятия по обеспечению безопасности ЭММ.

На рисунке 3.4 показана схема построения матричной структуры управленческой функции программно-целевого подхода к системе учета основных факторов, выраженных в критериальной форме.

Такой анализ дает возможность выявить источники потенциальных опасностей, идентифицировать их, определить количественные и качественные характеристики опасностей, а также возможные негативные последствия при их воздействии на человека. Методами сопоставления полученных показателей с нормируемыми требованиями по каждому виду опасности проводят факторную комплексную оценку состояния безопасности ЭММ. По результатам обследования состояния безопасности осуществляется организация мероприятий и составляются целевые программы по улучшению условий безопасности [124].

Управленческие функции СОБ осуществляют: на основе информации о совокупности мероприятий направленных на улучшение функционирования управляемых факторов системы в соответствии с имеющейся целью. Основное назначение функций управления процессом обеспечения безопасности выполняемых процессов с электроустановками, в т.ч. ЭММ, заключается в создании условий, необходимых для обеспечения соответствующих показателей на заданном уровне и сохранение их в допустимых пределах.

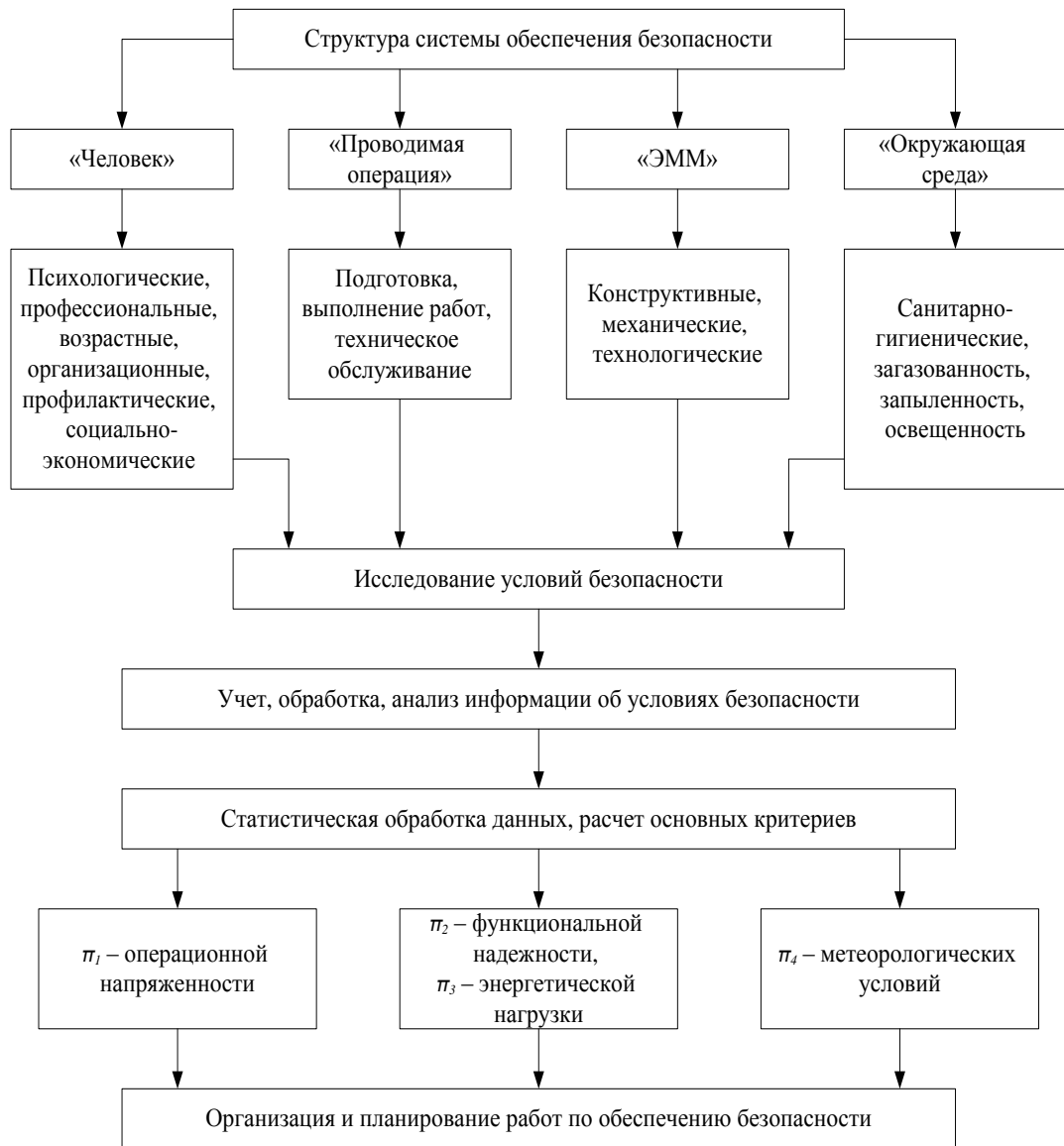


Рисунок 3.4 – Схема матричной структуры управленческой функции системы обеспечения безопасности ЭММ

С точки зрения моделирования СОБ представляет собой совокупность объекта управления и информационной части, связанных между собой информационным обеспечением (рисунок 3.5).

Состояние объекта управления (безопасность на рабочем месте) определяется входными параметрами факторов, воздействующих на безопасность эксплуатации применения (ЭММ):  $X_1, X_2, \dots, X_n$ . К ним относятся опасные и вредные производственные факторы. Поскольку, реальные производственные и

иные условия не являются абсолютно безопасными, то выходной характеристикой служит некоторый уровень обеспечения безопасности применения ЭММ:  $Y=f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ . Показатели количественной и качественной оценки уровня безопасности при эксплуатации ЭММ, являются критериями эффективности СОБ. Значения управляемых факторов системы, т.е. выходные характеристики, состояния безопасности ЭММ связаны через систему сбора информации.

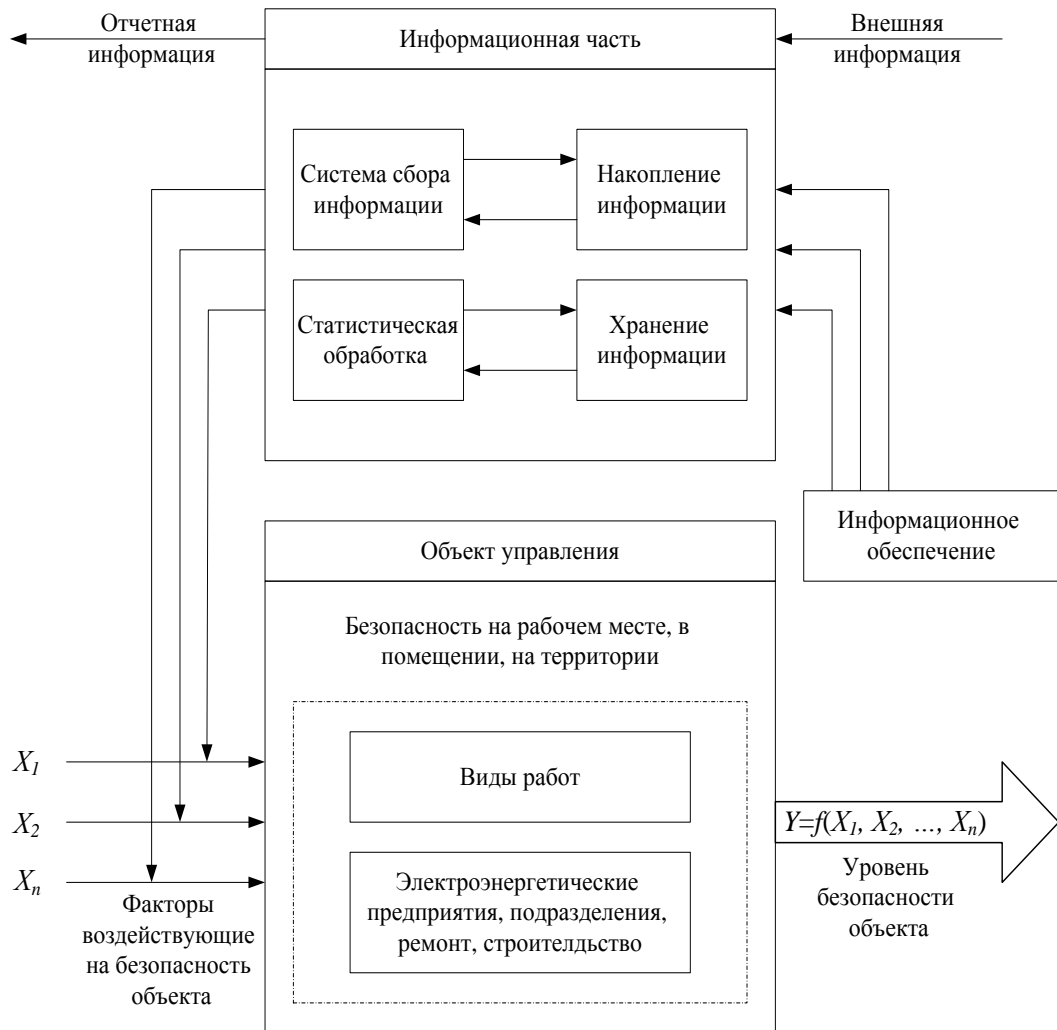


Рисунок 3.5 – Структурная схема информационной составляющей и объекта управления в системе обеспечения безопасности ЭММ

Информация о выявленных в процессе эксплуатационного контроля отклонениях от норм электрических параметров ЭММ, влияющих на их электробезопасные свойства, и о возникновении потенциальных опасностей, а также данные о несчастных случаях, поступают в информационную часть для

статистической обработки в целях исследования эффективности системы эксплуатации ЭММ и являются критериями эффективности СОБ. Внешняя информация, поступающая в информационную часть, есть: законодательная, нормативная, регламентирующая условия эксплуатации электроустановок (ЭММ).

Таким образом, основными задачами системы обеспечения безопасности являются: реализация оперативных функций управления и контроля, планирования, прогнозирования и анализа безопасности при эксплуатации ЭММ (рисунок 3.6).

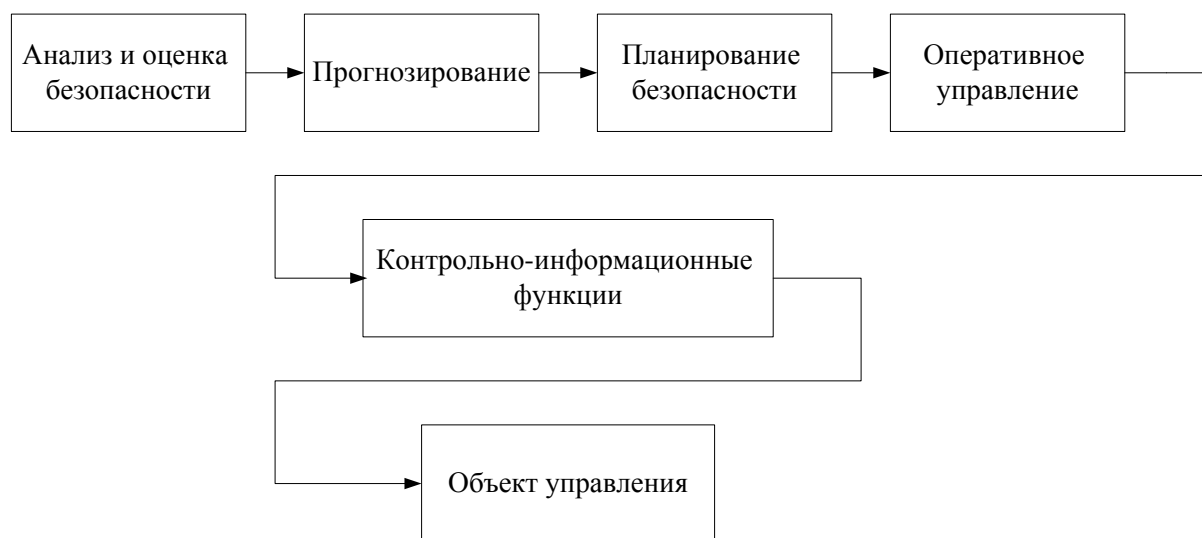


Рисунок 3.6 – Функциональная схема системы обеспечения безопасности ЭММ

Эксплуатационный контроль параметров электроустановок (ЭММ) позволяет получить информацию о фактическом состоянии условий безопасности и выявить имеющиеся отклонения от нормативных значений. Сбор и систематизация статистических данных о несчастных случаях на производстве позволяет провести анализ электротравматизма.

На основе информации, полученной в результате эксплуатационного контроля и анализа электротравматизма, проводится оценка и прогнозирование уровня электробезопасности электроустановок. При этом, как было отмечено выше, устанавливаются степень соответствия фактического состояния безопасности требуемому, выясняются причины, закономерности возникновения потенциальных опасностей, формулируются проблемные ситуации и

отыскиваются возможные пути их решения. Результаты анализа и прогноза состояния безопасности электроустановок (ЭММ) служат основой для разработки эффективных решений.

Одной из наиболее важных функций СОБ является планирование, которое предусматривает разработку комплексных планов улучшения мероприятий повышения уровня безопасности электроустановок.

Планирование мероприятий по безопасности электроустановок содержит следующие повторяющиеся этапы [119]:

- постановка приоритетных задач обеспечения безопасности электроустановок (ЭММ) рассматриваемых разнообразных видов работ;
- прогнозирование возможных травмоопасных ситуаций, возможных изменений системы обеспечения безопасности;
- выбор и обоснование основных способов обеспечения безопасности их функционирования;
- определение функций мероприятий по предупреждению возникновения и развития электротравматизма;
- выделение и распределение ресурсов по этапам выполняемых работ с электроустановками (ЭММ)
- отработка вопросов координации и взаимодействия при планировании обеспечения безопасности эксплуатации ЭММ.

В процессе прогнозирования условий функционирования СОБ главной задачей является повышение ее эффективности, что достигается путем внедрения и разработки технических средств защиты и проведением мероприятий по безопасности электроустановок (ЭММ). Используя технические средства защиты необходимо дать оценку характера возможного изменения качества компонентов исследуемой системы при изменении окружающих условий. Это позволяет прогнозировать реальные ситуации, предусмотреть дополнительные ресурсы или корректировать поставленные задачи [97].

При определении функционала и мероприятий по выполнению безопасности электроустановок (ЭММ), необходимо основываться из иерархической системы и возможности перераспределения поставленных задач между составляющими «человек» – «ЭММ» – «проводимая операция» – «окружающая среда».

Средствами для повышения безопасности при эксплуатации ЭММ являются организационные, технические, экономические, социальные. Важным этапом развития СОБ является формирование экономических средств предусматривающих материальную ответственность за ущерб, причиненный здоровью людей, рациональное использование средств, планируемых на проведение мероприятий по безопасности труда, определение экономических показателей безопасности электроустановок (ЭММ) [119, 124].

Задачи обеспечения безопасности решаются на основе применения современных средств обработки данных и экономико-математических методов.

В системе обеспечения безопасности электроустановок выполнены решения по созданию ЭММ с улучшенными техническими характеристиками при снижении опасных механических воздействий (вибрации), которые прямо или косвенно оказывают влияние на состояние безопасности машин. В результате разработки виброзащиты для ручной электрической машины получен патент на полезную модель [126].

Внедрение СОБ на предприятиях электроэнергетики Республики Бурятия, при использовании ЭММ, в условиях специфического взаимодействия компонентов системы «Ч-ЭММ-ПО-ОС», позволяет обеспечить необходимую безопасность людей.

### **3.5 Выводы**

1. В результате анализа основных факторов системы «человек» – «ЭММ» – «проводимая операция» – «окружающая среда» выделены наиболее значимые и на

основе теории подобия получены критерии подобия, являющиеся показателями системы безопасности электрических мобильных машин.

2. Принятые критерии подобия позволяют закономерно получить оценку состояния безопасности электрических мобильных машин в виде математической модели процесса возникновения электроопасных ситуаций, которая показывает, что наибольшее количество электротравм происходит из-за факторов подсистемы «ЭММ» и составляет 60,90%.

3. В результате оценки уровня электробезопасности электрических мобильных машин, в детерминированном и вероятностном виде, установлено:

– показатель электротравматизма со смертельным исходом стабилен, остается достаточно высоким  $K_{\text{л}} = 35 \cdot 10^{-6} \cdot 100\%$ ;

– вероятность электропоражения  $P(\text{ЭП}) = 13,32 \cdot 10^{-6}$ , что превышает рекомендуемую норму в более чем 4 раз.

4. Управляющая функция является составляющей частью системы обеспечения безопасности и построена на основе совокупности факторов системы и моделировании взаимосвязи объекта управления и информационной части.

5. Задачами системы безопасности являются: реализация оперативных функций управления и контроля, планирования, прогнозирования и анализа безопасности при эксплуатации ЭММ.



## **4 МЕХАНИЗМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОГЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ЭММ**

### **4.1 Методы совершенствования безопасной работы ЭММ**

В отличие от большинства электротехнических изделий электрической мобильной машиной пользуются лица, зачастую не имеющие специальной подготовки, поэтому такая машина и ее двигатель должны удовлетворять особо высоким требованиям безопасности. Основным документом, определяющим требования безопасности к электрическим мобильным машинам, является Публикация Международной электротехнической комиссии (МЭК) [127]. Этому документу соответствуют требования государственных стандартов, санитарных норм и др.

Как указано в параграфе 1.1 по степени защиты оператора от поражения электрическим током машины и их двигатели делятся на три класса I, II, III.

Защита от поражения электрическим током оператора ЭММ обеспечивается наличием не менее чем двух не зависящих друг от друга защитных средств. Этими защитными средствами являются основная изоляция на всех элементах, находящихся под напряжением, у машины любого класса и, кроме того, заземление всех доступных для прикосновения металлических частей у машин класса I; дополнительная или усиленная изоляция всех доступных для прикосновения частей у машин класса II; особо низкое напряжение и электрическое разделение цепей в источнике питания у машин класса III [42, 63].

Установлено, что среди всех видов травм, электротравма по количеству смертельных исходов занимает одно из первых мест [35], поэтому снижение уровня электротравматизма возможно при правильной научной постановке решения вопросов электробезопасности.

Комплексное решение вопросов электробезопасности при эксплуатации ЭММ имеет решающее значение с точки зрения снижения возникновения электротравматизма. Поскольку ЭММ эксплуатируются в самых различных

условиях по состоянию окружающей среды и топографическим условиям, в связи с этим вероятность возникновения опасной ситуации увеличивается. Необходимость применения электроразличительных средств определяется характером помещений и условиями использования ЭММ в работе [42]. В соответствии с принятой классификацией помещений по степени опасности поражения людей электрическим током применяется определенный вид защиты. В таблице 4.1 приведены классы ЭММ и способы электроразличительных средств в таких помещениях.

Таблица 4.1 – Условия использования в работе электрических мобильных машин различных классов

Место проведения работ	Класс электрических мобильных машин по типу защиты от поражения электрическим током	Необходимость применения электроразличительных средств
Помещение без повышенной опасности. Помещения с повышенной опасностью	I	Применение хотя бы одного из электроразличительных средств (диэлектрических перчаток, ковров, подставок, галош) Без применения электроразличительных средств, если при этом только один электроприемник получает питание от отдельного трансформатора, автономной двигательной установки, преобразователя частоты с разделительными обмотками или через устройство защитного отключения(УЗО)
	II	Без применения электроразличительных средств
	III	Без применения электроразличительных средств
Особо опасные помещения	I	Не допускается применять
	II	Без применения электроразличительных средств
	III	Без применения электроразличительных средств
Вне помещений (наружные работы)	I	Не допускается применять
	II	УЗО и дополнительные электроразличительные средства
	III	Без применения электроразличительных средств

## Продолжение таблицы 4.1

При наличии особо неблагоприятных условий (в сосудах, аппаратах и других металлических емкостях с ограниченной возможностью перемещения и выхода)	I	Не допускается применять
	II	Применение хотя бы одного из электрозащитных средств (диэлектрических перчаток, ковров, подставок, галош). Без применения электрозащитных средств, если при этом только один электроприемник получает питание от разделительного трансформатора, автономной двигатель-генераторной установки, преобразователя частоты с разделительными обмотками или через устройство защитного отключения(УЗО)
	III	Без применения электрозащитных средств

В ПУЭ отмечено, что в электрических сетях до 1000В предусматривается применение устройств защитного отключения (УЗО) в аварийных режимах сети при работе с электроустановками [42].

Устройство защитного отключения является наиболее эффективным и экономически целесообразным защитным средством, надежно срабатывающим при опасных ситуациях, связанных с непосредственными касаниями токоведущих частей электроустановок и оборудования или при электрических пробоях изоляции и замыканиях на корпус, а также при снижении сопротивления изоляции ниже допустимой величины [128,129].

УЗО получили широкое распространение во многих странах мира: США, Великобритании, Германии, Австрии, Японии и др., являющихся ведущими в области освоения защитного отключения и имеющими высокий уровень развития данной аппаратуры. Достаточно полная классификация и сравнительный анализ устройств защитного отключения приведены [130, 131, 132, 133, 134].

В современных условиях развития объектов экономики страны созданы условия для массового внедрения УЗО по току утечки в различных сферах деятельности человека [117, 118]. Такое внедрение может осуществляться на действующих и проектируемых объектах. Однако введение УЗО в состав систем безопасности на действующих объектах потребует значительных затрат [125].

В настоящее время наметилась тенденция формирования и перспективы развития рынка УЗО в России. В [118] отмечено, что в странах Западной Европы

ежегодно производится и устанавливается свыше 10 млн. УЗО различных типов. Степень их насыщенности оценивается из соотношения 3,5 единицы электрозащитной аппаратуры в среднем на каждого жителя. В России за последние двадцать пять лет установлено менее 1 млн. УЗО отечественного и зарубежного производства. Ёмкость потенциального рынка УЗО в России оценивается ориентировочно в 30 млн. единиц, т.е. одно УЗО на 5 человек.

В основу всех УЗО положен принцип использования в качестве датчика, т.е. дифференциального трансформатора тока (ДТТ), выходной сигнал которого приблизительно пропорционален разности (дифференциалу) токов в первичных проводниках трансформатора [135]. Ток утечки в землю в защищаемой зоне является для ДТТ дифференциальным током, вызывающим появление выходного сигнала, поэтому в некоторых описаниях УЗО дифференциальный трансформатор тока называют датчиком тока утечки (ДТУ). Для всех УЗО, реагирующих на разность токов в нагрузочных первичных проводниках в [135] установлено общее обозначение УЗО-Д, а в международных стандартах [136, 137] введены обозначения ВДТ (выключатель дифференциального тока), АВДТ (автоматический выключатель дифференциального тока).

Существующие стандарты [136, 137] определяют основное назначение всех типов УЗО, в том числе ВДТ и АВДТ, как дополнительную защиту людей от поражения электрическим током при прикосновении к открытым токоведущим частям электроустановок.

В соответствии с требованиями ПУЭ и ГОСТ в таблице 4.2 приведены основные функции УЗО [138].

К наиболее важным характеристикам УЗО относятся [128]:

- число фаз защищаемой сети;
- рабочий ток в защищаемой сети;
- номинальное напряжение питания;
- уставка срабатывания и время срабатывания;
- наличие защиты от перегрузки и коротких замыканий;
- возможность самоконтроля исправности.

Таблица 4.2 – Основные и дополнительные функции устройств защитного отключения.

Главная и обязательная дополнительная	Стандартные		Вспомогательные
	Определяющие тип	Рекомендуемые	
Отключение защищаемой цепи от питающей сети, когда дифференциальный ток, возникающий от тока утечки или тока замыкания на землю, превышает заданное значение; эксплуатационный контроль УЗО	Защита от сверхтоков; выдержка времени срабатывания (тип S); обеспечение чувствительности к току замыкания на землю, содержащему составляющую постоянного тока (тип А); защита от понижения напряжения; автоматическое повторное включение	Сохранение чувствительности УЗО к току утечки в случае двойного заземления нулевого рабочего проводника; самоконтроль исправности; указатель положения главных контактов	Защита от импульсных перенапряжений; защита от временных перенапряжений; защита от тепловых воздействий (температурная защита); индикация наличия напряжения в питающей сети; дистанционное отключение УЗО; сигнализация о причине срабатывания УЗО; обеспечение чувствительности УЗО к току нагрузки при повторном заземлении нулевого рабочего проводника; защита от пропадания фазы; защита от потенциала на корпусе электрооборудования относительно земли; контроль исправности защитного проводника

В таблице 4.3 приведены технические характеристики УЗО отечественного и зарубежного производства, в соответствии с [117, 138].

Выбор средств защиты в значительной мере зависит от системы заземления сети. Согласно [139, 140, 141] предусмотрены три системы заземления сетей: ТТ–нейтраль источника питания и корпуса электроприёмников заземлены, причём заземления могут быть отдельные; TN–нейтраль источника питания заземлена, а

корпуса электроприёмников занулены; IT–нейтраль источника питания изолирована, а корпуса электроприёмников заземлены.

В электрической сети с системой TT корпуса ЭММ через устройства для заземления подключаются к заземляющему устройству [142, 143]. При однофазном замыкании на землю максимальная токовая защита автоматического выключателя не срабатывает ввиду недостаточного значения тока замыкания, ограниченного сопротивлениями нейтрали и заземления ЭММ, включенными последовательно. В таком случае прямое прикосновение к токоведущим частям всегда опасно, т.к. напряжение прикосновения равно фазному напряжению сети. Косвенное прикосновение (к корпусу ЭММ) также может быть опасно. Поэтому для быстрого отключения ЭММ необходима установка УЗО в начале питающей сети, а для более эффективной защиты – на каждой ЭММ, согласно ПУЭ.

В электрической сети с системой TN применяются ЭММ любого класса защиты. При использовании класса I заземлять ЭММ не рекомендуется. При однофазном замыкании на землю в такой сети ток замыкания будет достаточным для срабатывания максимальной токовой защиты автоматического выключателя, т.к. сопротивление петли фаза-ноль будет незначительным. Прямое прикосновение к токоведущим частям при эксплуатации ЭММ всегда опасно, т.к. напряжение прикосновения равно фазному напряжению питающей сети. Поскольку ЭММ в основном эксплуатируется в тяжёлых условиях с точки зрения безопасности, значит и косвенное прикосновение при работе с ЭММ, также может быть опасно, поэтому в таких сетях напряжением 380/220В необходимо применение УЗО, несмотря на то, что сеть с системой TN обеспечивает быстрое срабатывание максимальной токовой защиты по сравнению с сетью системы TT [144].

В электрической сети с системой IT могут применяться ЭММ класса I, присоединённые к сетям заземления. При большой ёмкости питающей сети прямое прикосновение к токоведущим частям опасно. Ввиду незначительной величины однофазного тока замыкания на землю косвенное прикосновение мало опасно. Напряжения прямого и косвенного прикосновения в сети IT значительно отличаются от соответствующих напряжений в сетях TT и TN [144].

Таблица 4.3 – Технические характеристики УЗО отечественного и зарубежного производства

Техническая характеристика	УЗО20-ВАД1	ВЗД2	УЗО22	УЗО-Д-АС-2000	УЗО-щит	ВКЗ-2, ВКЗ-4	DPN N Vigi	C60 Vigi	УЗО20-ВАД1
Номинальное напряжение, В	220	220	220	220	380/220	220	380/220	220	380/220
Допустимое рабочее напряжение цепи питания, В	0,5 – 1,1	0,5 – 1,2	0,5 – 1,15	0,2 – 1,2	0,23 – 1,1	0,8 – 1,1	0,5 – 1,1	-	-
Номинальный ток, А	6,3; 10; 16; 25; 32	6,3; 10; 16; 25; 32	10; 16; 25; 32; 40	10; 31,5; 40	6; 10; 16; 20; 25; 32	6; 10; 16; 25; 40	10; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63	6,0; 10; 16; 20; 25; 32; 40	10; 16; 25; 32; 40; 63
Уставка срабатывания, А	0,01; 0,03	0,01; 0,03	0,01; 0,03; 0,1	0,01; 0,03	0,01; 0,03; 0,1; 0,3	0,006; 0,01; 0,02; 0,03; 0,05	0,01; 0,03; 0,1; 0,3	0,03	0,03-0,01
Число полюсов	2	2	2	2	2; 4	2	2; 4	2	2; 3; 4
Вид входного сигнала	$I_{\Delta}$	$I_{\Delta}$	$I_{\Delta}$	$I_{\Delta}$	$I_{\Delta}$	$I_{\Delta}$	$I_{\Delta}, U_N, U_0$	$I_{\Delta}$	$I_{\Delta}$
Наличие функциональной зависимости от $U_c$	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Нет	Да
Наличие встроенной защиты от сверхтоков	Да	Да	Да	Да	Да	Нет	Да	Да	Да
Отключение при обрыве PEN-проводника на стороне питания	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Да	Нет	Нет
Отключение при опасном напряжении $U_N$ между землей и открытыми частями	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Да	Нет	Нет
Отключение при замыкании вида фаза-земля на стороне питания	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Да	Нет	Нет
Отключение при обрыве фазного провода на стороне питания	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет; Да	Нет	Нет

Поскольку выпускаемые отечественной промышленностью и применяемые зарубежные ЭММ могут быть однофазные и трёхфазные [36, 145] и в основном широко используются II класса защиты, значит источником питания являются TN сети однофазные и трёхфазные. Выше отмечено, что ЭММ применяются в различных производственных помещениях и на территории предприятий электроэнергетики, поэтому в зависимости от условий эксплуатации используется тип УЗО.

В [117] указано, что защита от поражения электрическим током при прикосновении к открытым проводящим частям (корпусам) в системах TN-C и TN-S происходит путем экстренного отключения защищаемого участка токовой защитой при замыкании фазных проводов, соединенных с PEN или PE-проводником корпуса электроприборов. Для надежной работы таких систем требуется большой ток замыкания, что далеко не всегда выполнено. С появлением УЗО и применением их в системе TN-C-S надежность защиты значительно повысилась.

Расчётная нагрузка в электроэнергетических производственных помещениях, где используются ЭММ, зависит от количества работающих электроустановок, их потребляемой мощности и в соответствии с этим осуществляется выбор УЗО для совместной и индивидуальной защиты. При работе с ЭММ на территории предприятий, в производственных помещениях устанавливаются УЗО на вводе питающей сети [74, 146]. При нагрузке до 10кВт УЗО должны быть рассчитаны на работу в трёхфазной сети с рабочим током до 50А.

Учитывая возможность использования УЗО для однофазной, двухфазной и трёхфазной сети целесообразно напряжение питания выбирать равным 220 и 380В.

Основными параметрами, определяющими эффективность устройств защитного отключения, является ток уставки и время срабатывания. Для повышения электрзащитной эффективности ток уставки УЗО и время его срабатывания необходимо уменьшать, а для обеспечения надёжного электроснабжения – увеличивать. Анализ существующих отечественных и



зарубежных УЗО показывает, что отсутствует единое мнение в выборе уставок срабатывания [16, 147, 148, 149].

Обоснование предельных уставок унифицированного ряда УЗО для сетей с заземленной нейтралью даётся в [15], где указывается, что разработка и внедрение унифицированного ряда УЗО предусматривается Координационным планом на 1976-1980 г.г. по теме 07408 «Разработать и внедрить методы и средства, обеспечивающие снижение травматизма, профессиональной заболеваемости и улучшения санитарно-гигиенических условий труда». в указанной работе на основании выполненных исследований и с учётом рекомендованных для стран СЭВ значений установок (5, 10, 30, 100, 300, 500, 1000мА) предлагаются значения уставок для унифицированного ряда УЗО (см. таблицу 4.4).

Таблица 4.4 – Значения уставок для унифицированного ряда УЗО

Номинальный ток нагрузки в зоне защиты, А	10	25	40	63	100
Уставка при работе в зоне защиты одиночного потребителя, мА	10	10	30	30	100
Уставка при работе в зоне защиты группы потребителей, мА	10	30	30	100	300

Номинальный ток нагрузки в зоне защиты, А	160	250	400	630
Уставка при работе в зоне защиты одиночного потребителя, мА	300	500	500	1000
Уставка при работе в зоне защиты группы потребителей, мА	500	500	1000	1000

Приводятся сведения о типах УЗО, уставках срабатывания, в национальных нормах Франции, Германии, Великобритании, Японии, Австрии, США и др. и их соответствии международным нормирующим документам [148, 149, 150, 151, 152].

В перечисленных выше странах, в том числе и России, даны сведения о том, что для защиты людей от поражения электрическим током общепринятой является  $I_{уст}=30$  мА, а для защиты от возгораний при повреждении изоляции и т.п. – 300 мА и 500 мА. Ток, на который реагирует УЗО, при прикосновении человека к токоведущим частям определяется не только сопротивлением тела человека, но зависит также от сопротивления заземления нулевого провода [153].

Кроме того, на устойчивую работу УЗО оказывают влияние напряжение небаланса и частотные характеристики дифференциального трансформатора тока, нелинейность и несинусоидальность токов и напряжений в электрических сетях, переходные процессы и др. [117].

Таким образом, выбирая уставку срабатывания [15, 147] в производственных помещениях с учётом работы электроустановок, в т.ч. ЭММ, при групповой защите и установке на вводе в помещение необходимо увеличить уставки срабатывания УЗО в зависимости от установленной мощности нагрузки и номинального тока в питающей сети, т.е. в пределах 300; 500мА, а при индивидуальной работе ЭММ – 30 мА, при групповой – 100 мА.

В частности, при эксплуатации ЭММ не исключено, что токоведущие части электродвигателя могут замыкать на корпус или в процессе работы может быть повреждена изоляция токоведущих жил питающего кабеля при скручиваниях, трениях, ударах. В результате человек подвергается опасности электротравмирования при прикосновениях к корпусу ЭММ или к повреждённым участкам питающего кабеля. Кроме того, возникают повреждения изоляции токоведущих частей при использовании удлинителей.

При однополюсных прикосновениях к токоведущим частям ЭММ защита с помощью УЗО при уставке 30 мА и более обеспечивается в 70-80%. В то же время величина тока утечки в 30 мА превышает пороговые значения неотпускающего тока, что приводит к снижению электротранспортной эффективности УЗО с уставкой срабатывания 30 мА и выше [154, 155].

Поэтому при выборе времени срабатывания УЗО представляется очевидным уменьшение его значения, что позволяет снижать вероятность смертельного электропоражения в случае попадания человека под напряжение. В соответствии с нормами предельно допустимых токов через тело человека [10, 41] в течение 1с допустимо воздействие тока не более 50 мА, а в течение 0,1с-500 мА. При этом сочетании тока и времени отключения должен обеспечиваться благополучный исход электротравмы. Другими словами, электротранспортная (ампер-секундная) характеристика УЗО должна проходить ниже кривых безопасности, установленных нормами [7] и МЭК [156].

В соответствии с требованиями МЭК [156] на рисунке 4.1 приведены кривые безопасности. Кривая 2, рекомендуемая как «кривая электробезопасности», представляет границу, выделяя две области: А – безопасную и В – опасную, в которой возможно электротравмирование человека с тяжёлыми последствиями. Аналитически кривая 2 описывается выражением:

$$I = 183,75 \cdot e^{-2,66t}, \quad (4.1)$$

где  $I$  – ток, воздействующий на человека, мА;  $t$  – продолжительность воздействия, с.

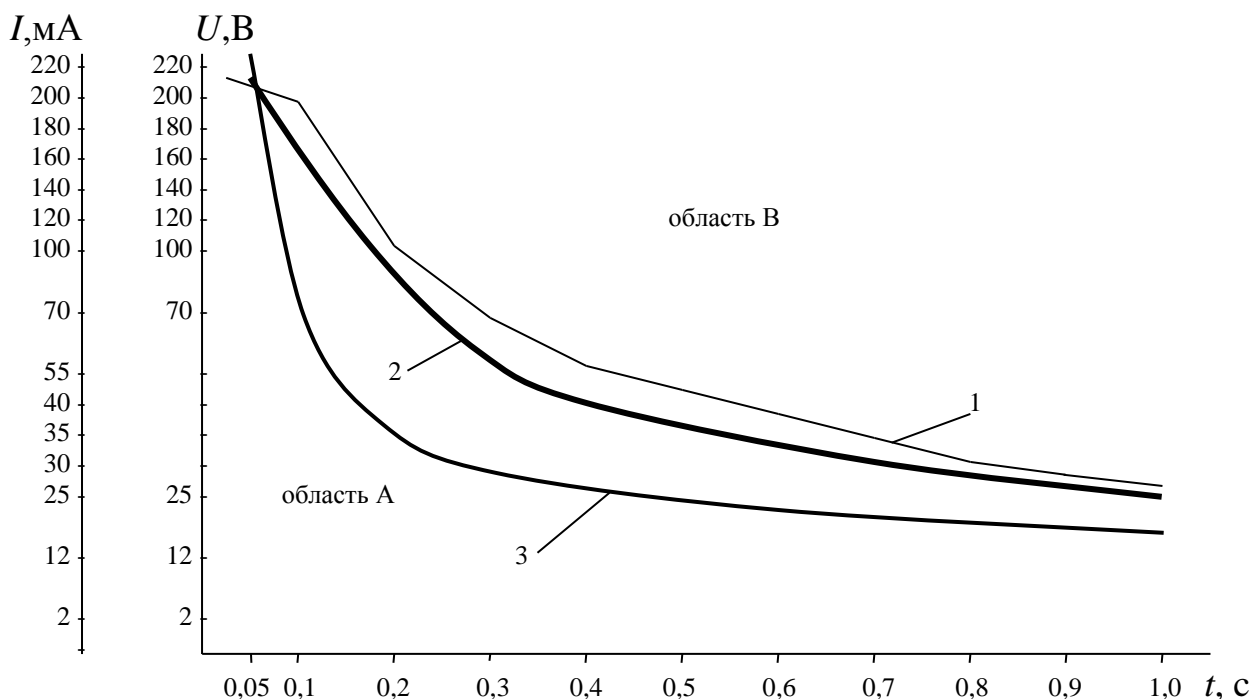


Рисунок 4.1 – График предельно допустимых  $U_{пр}$ ,  $I_{h доп}$  в зависимости от времени воздействия  $t$ :

1 – нормируемые величины  $U_{пр доп}$  и  $I_{h доп}$  (по ГОСТ 12.1.038-01); 2 – кривая электробезопасности; 3 – кривая предельно допустимых токов (по данным МЭК).

Учитывая, что техническим пределом времени отключения современных коммутационных аппаратов является (0,01...0,05)с, значит время отключения УЗО должно быть не более 0,05с.

Одним из главных требований, предъявляемых к УЗО, является обеспечение высокой эксплуатационной надёжности этих устройств. В последние годы появилось много работ по разработке новых конструкций и совершенствованию известных УЗО обладающих высокой эксплуатационной надёжностью.

В частности, одним из требований, которому должны отвечать УЗО, является их многофункциональность, т.е. защита контролируемой сети от следующих аварийных и ненормальных режимов:

- однофазных коротких замыканий;
- двух и трёхфазных коротких замыканий;
- перегрузок;
- токов утечки на землю.

Эти функции реализуются при выполнении УЗО на базе современных автоматических выключателей [138].

Одним из важнейших качеств УЗО является самоконтроль исправности схемы. Учитывая нерегулярность проверок УЗО электротехническим персоналом или его низкую квалификацию, отсутствие указанного качества схемы может привести к длительной эксплуатации неисправных УЗО, тем самым, подвергая высокой опасности электропоражения людей работающих с электроустановками (ЭММ). Поэтому исправность УЗО должна контролироваться самим защитным аппаратом.

Как показывает анализ защитных аппаратов (таблица 4.3), указанной совокупности технических требований в настоящее время не отвечает ни один из отечественных и зарубежных образцов электрозащиты.

## **4.2 Разработка устройства защитного отключения (УЗО-адаптер)**

Переносное устройство защитного отключения (УЗО-вилка, УЗО-адаптер) применяется при отсутствии стационарно установленного УЗО. Функции этих УЗО соответствуют стандартным защитным функциям УЗО [135]. Предназначены УЗО-вилка или УЗО-адаптер для организации оперативной защиты людей от поражения электрическим током при прикосновении к токоведущим частям электрической

сети или к корпусу электроустановки, оказавшемуся под напряжением при повреждении изоляции токоведущих частей и замыкании на корпус и защиту от воспламенения, могущего возникнуть вследствие длительного протекания токов утечки, также повреждении изоляции и замыкании на землю. Переносные УЗО могут быть однофазные и трехфазные с регулируемой уставкой срабатывания (10 и 30мА) [74, 146].

Переносные УЗО применяются при групповой и одиночной защите и, в обязательном порядке, в сложных, с точки зрения электробезопасности, условиях эксплуатации электроустановок, в том числе ЭММ. В частности, данные УЗО используются при работе с ЭММ в различных помещениях и на открытом воздухе, т.е. на территории предприятия, а в случае неисправности мобильной машины (повреждении изоляции токоведущих частей и замыкании на металлические части корпуса) для защиты людей от электротравмирования. Применение переносных УЗО предупреждает возможное возгорание, искрение и нагрев электропроводки в результате вероятного короткого замыкания, т.е. УЗО отслеживает опасный процесс на этапе утечки тока и отключает электроустановку (ЭММ) от источника питания. УЗО-вилка и УЗО-адаптер обладают достаточной чувствительностью, чтобы отреагировать на неосмотрительное использование ЭММ или на неправильное обращение с электропроводкой, питающим кабелем, удлинителем, приводящим к возникновению дефектов изоляции токоведущих частей и, как следствие, токов утечки, превышающих уставку срабатывания УЗО.

В соответствии с требованиями приведенными в параграфе 4.1 нами разработано переносное устройство защитного отключения типа ДПА-Т (дифференциальный переносной адаптер-трехфазный), т.е. УЗО-адаптер, получен патент на полезную модель [157].

Основными составными элементами УЗО-адаптера ДПА-Т являются следующие (см. рисунок 4.2):

- Дифференциальный трансформатор тока, (ДТТ);
- Коммутационный блок (силовая контактная группа), (КБ);
- Цепь включения, (ВКЛ);

- Катужка отключения (соленоид), (КО);
- Цепь тестирования, (Т);
- Усилитель-преобразователь.

В состав усилителя-преобразователя входят следующие элементы:

- Электронный усилитель, (ЭУ);
- Пусковое устройство, (ПУ).

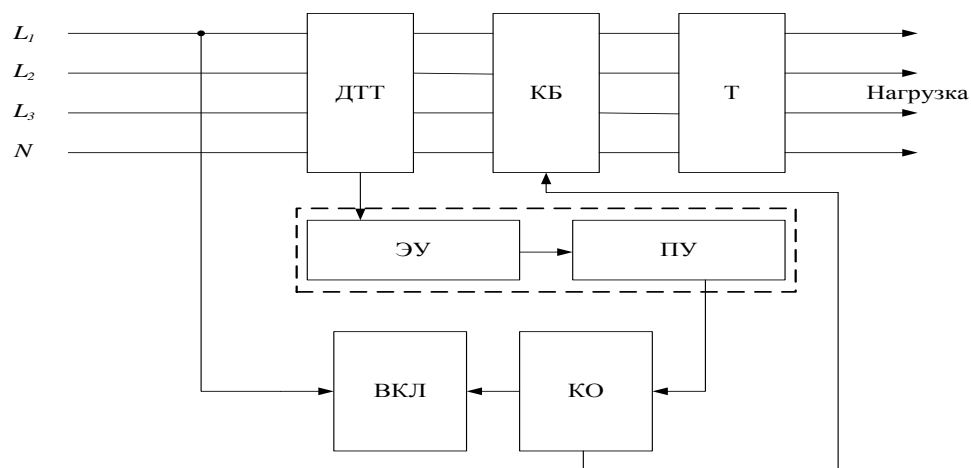


Рисунок 4.2 – Функциональная схема УЗО-адаптера ДПА-Т

Электрическая схема устройства ДПА-Т приведена на рисунке 4.3 а внешний вид устройства без съемной крышки представлен на рисунке 4.4.

Трёхфазное УЗО (ВДТ) работает следующим образом. При включении трёхфазного выключателя дифференциального тока (УЗО-адаптера) в сеть трёхфазного источника питания в фазных и нулевом проводниках 3 возникает ток и силовые контакты 7 оказываются под напряжением.

Одновременно на одну полуобмотку соленоида 6 (КО), подключенную к фазному и нулевому проводникам, подаётся напряжение (при включенной вилке 9 адаптера в розетку источника питания эта полуобмотка постоянно находится под напряжением). Вторая полуобмотка соленоида присоединяется к кнопке 11 («ВКЛ») (в индикаторном отверстии включается индикатор красного цвета), и во второй полуобмотке соленоида появляется напряжение. В результате соленоид 6 замыкает контакты силовой контактной группы 7 и в фазных проводах от источника питания к нагрузке протекает ток или УЗО-адаптер пропускает ток. При

отпускании кнопки «ВКЛ» во второй полуобмотке соленоида напряжение исчезает, а соленоид удерживает силовые контакты в замкнутом состоянии при наличии напряжения в первой полуобмотке соленоида. В момент включения вилки адаптера в розетку источника питания силовая контактная группа находится в разомкнутом состоянии.

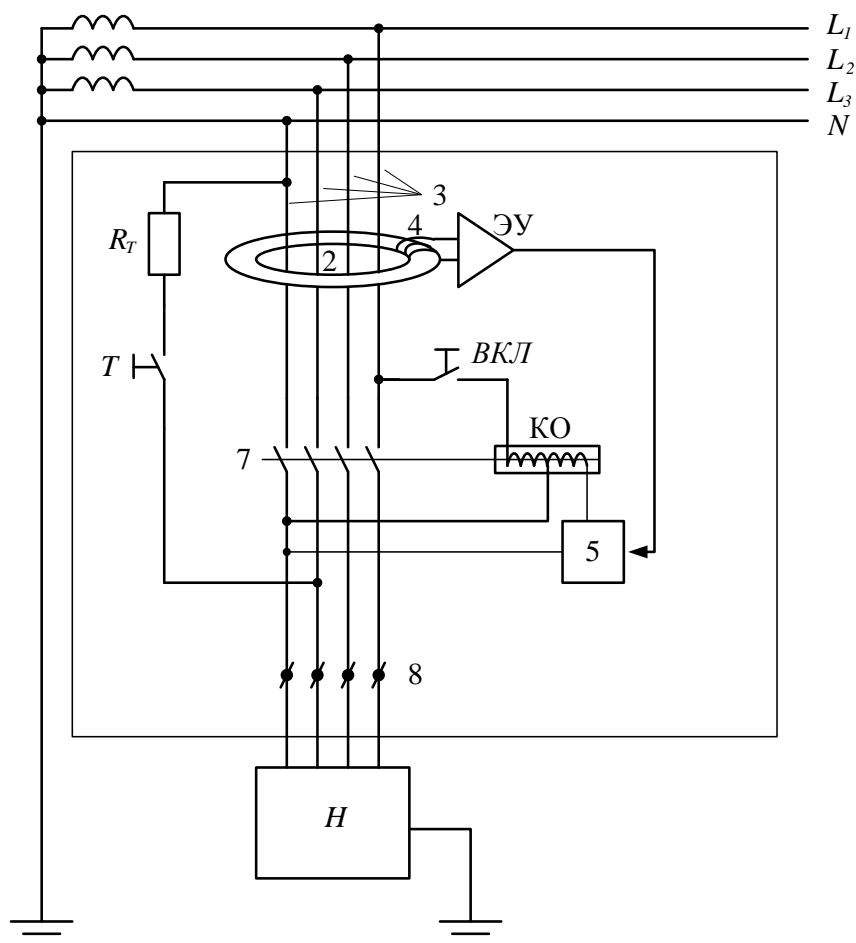


Рисунок 4.3 – Электрическая схема устройства защитного отключения ДПА-Т

В нормальном режиме, т.е. при отсутствии тока утечки, геометрическая или векторная сумма токов (четырёх токов) в фазных и нулевом проводниках равна нулю и суммарный магнитный поток, создаваемый этими токами, тоже равен нулю. При возникновении тока утечки в защищаемой цепи (например, прикосновение человека, стоящего на токопроводящем полу к фазному проводнику или прикосновение к корпусу электроустановки, оказавшемуся под напряжением в результате повреждения изоляции токоведущих частей и замыкания на корпус)

происходит нарушение баланса токов в фазных и нулевом проводниках 3 и суммарный магнитный поток в сердечнике дифференциального трансформатора тока 2, пропорциональный разности токов в проводниках первичной обмотки, наводит ЭДС (электродвижущую силу), создающую ток во вторичной обмотке 4. Если этот ток превышает значение уставки порогового элемента 5, т.е. пускового устройства, подключённого ко вторичной обмотке через электронный усилитель ЭУ дифференциального трансформатора тока и к полуобмотке соленоида, удерживающего силовые контакты в замкнутом положении, оно срабатывает, воздействуя на исполнительный механизм (соленоид и силовую контактную группу), отключая питание соленоида. Отключенный соленоид не удерживает контакты силовой контактной группы, и они размыкаются под действием силы пружины, обесточивая неисправную нагрузку Н.

Функционально УЗО-адаптер представляет быстродействующую электрозашиту, время отключения дифференциального тока (тока утечки) составляет 0,03 сек.

Для осуществления контроля исправности кнопка 10 (Т - «ТЕСТ») позволяет проверить работоспособность УЗО-адаптера путём пропускания небольшого тока через тестовый резистор. Тестовый резистор подключается к нулевому проводнику, пропущенному через окно сердечника дифференциального трансформатора тока, и к кнопке «ТЕСТ», от кнопки «ТЕСТ» к фазному проводнику соединённому с источником питания. Поэтому ток в тестовой цепи эквивалентен несбалансированному току в проводниках первичной обмотки, и при нажатии на кнопку «ТЕСТ» происходит быстрое срабатывание УЗО (отключение напряжения, подаваемого на защищаемую электроустановку), значит оно исправно. В индикаторном отверстии исчезает индикатор красного цвета. Если УЗО не отключилось, значит, оно неисправно.

Основные технические параметры УЗО-адаптера ДПА-Т приведены в таблице 4.5.



Таблица 4.5 – Основные технические параметры УЗО-адаптера ДПА-Т

№ п/п	Наименование параметра	Величина
1	Номинальное напряжение, В	380
2	Номинальный ток, А	16
3	Характеристика функционирования при наличии дифференциального тока с составляющей постоянного тока, А	
4	Номинальный отключающий дифференциальный ток (уставка), мА	30
5	Время отключения, с	0,03
6	Электрическая износостойкость, циклы В-0	Не менее 10 000
7	Механическая износостойкость, циклы В-0	Не менее 20 000
8	Климатическое исполнение и категория помещения	УХЛ4
9	Степень защиты	IP20/IP44
10	Срок службы, лет	15

На рисунке 4.4 в УЗО-адаптере в корпусе 1 фазный и нулевой проводники 3 подключены к четырем штырям вилки 9, пропущены в окно тороидального сердечника дифференциального трансформатора тока 2 и подключены к контактам силовой контактной группы 7, а также к четырем силовым упругим пластинам 8 розетки, в которую включается нагрузка.

Лабораторные испытания УЗО-адаптера ДПА-Т проводились по следующей методике:

- Проверка уставки срабатывания по току утечки при нормальных условиях (температура воздуха +20°С, относительная влажность воздуха 75%);
- Проверка времени срабатывания;
- Проверка самоконтроля работоспособности.

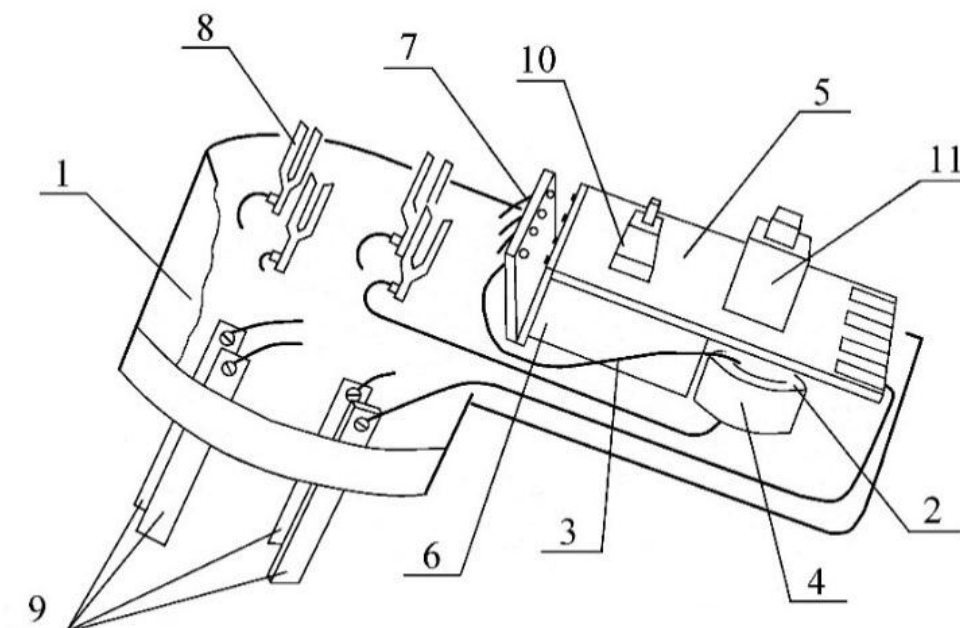


Рисунок 4.4 – Внешний вид УЗО-адаптера ДПА-Т

1 – корпус, 2 – ДТТ, 3 – первичная обмотка, 4 – вторичная обмотка,  
5 – пороговый элемент, 6 – соленоид, 7 – силовая контактная группа,  
8 – розетка, 9 – вилка, 10 – ТЕСТ, 11 – ВКЛ.

Внешний вид панели лабораторного стенда приведен на рисунке 4.5.

Органы управления стенда (см. рисунок 4.5):

- выключатель с подсветкой «Сеть» (замыкание/размыкание переключателя  $SA1$ ) для включения/выключения стенда;
- устройство защитного отключения дифференциального типа;
- переключатель типа УЗО;
- индикатор тока тела человека и времени срабатывания УЗО;
- переключатель сопротивления обуви человека « $R_{об}$ , (кОм)»;
- переключатель сопротивления пола « $R_{пола}$ , (кОм)»;
- кнопка с подсветкой «КАСАНИЕ» для прямого однополюсного прикосновения человека с токоведущим частям, находящимся под напряжением (замыкание переключателя  $SA2$ ).

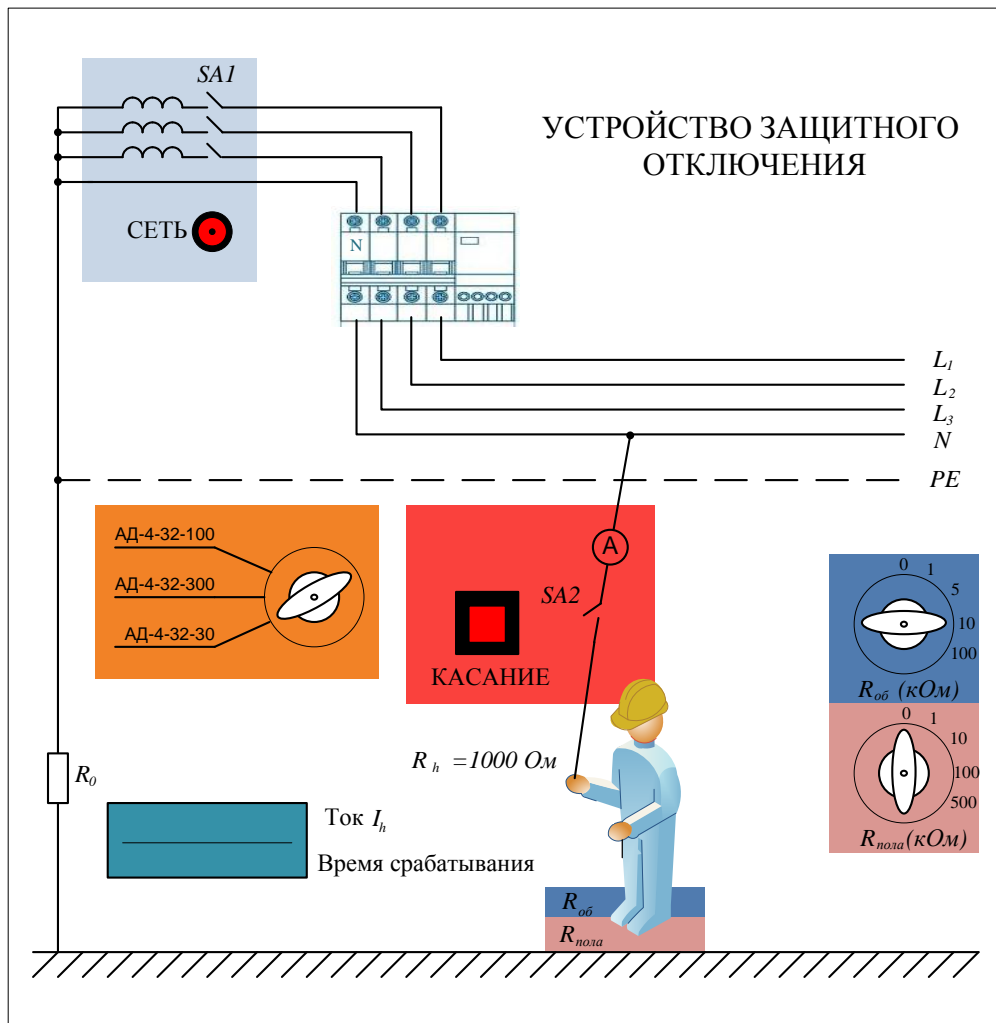


Рисунок 4.5 – Внешний вид панели стенда

Лабораторный стенд представляет собой модель трехфазной электрической сети с подключением нагрузки через устройство защитного отключения (УЗО) для защиты человека от поражения электрическим током при прикосновении к металлическим частям нагрузки, которые могут оказаться под напряжением, а также к металлическим частям, оказавшимся под напряжением вследствие повреждения изоляции.

С помощью переключателя «УЗО» в стенде моделируются характеристики трехфазных УЗО дифференциального типа с разными номинальными отключающими дифференциальными токами (токами срабатывания) 30 мА, 100 мА, 300 мА (для УЗО-адаптера 30 мА) и времени срабатывания. В результате лабораторных испытаний установлено, что УЗО-адаптер ДПА-Т соответствует техническим параметрам.

При проведении испытаний установлено, что функции УЗО-адаптера соответствуют стандартным защитным функциям УЗО [137] и оно может широко использоваться при оперативной защите людей от поражения электрическим током при работе с электроустановками, в том числе ЭММ на объектах электроэнергетики и других.

### **4.3 Социальная и экономическая эффективность применения средств электрозащиты ЭММ**

В качестве основного критерия оценки социально-экономической эффективности мероприятий по охране труда используется годовой экономический эффект как обобщающий показатель эффективности внедряемых достижений науки и техники, который характеризует прирост национального дохода за счёт научно-технического прогресса [158, 159].

Как отмечено в [159], увеличение объёма финансирования работ по охране труда направлено на повышение безопасности электрооборудования и рабочих мест, внедрение нового поколения средств электрозащиты, повышение эффективности безопасности работы систем.

Задачи оптимизации систем электробезопасности базируются на основе учёта показателей технической и социально-экономической эффективности. В работе [8] изложена концепция «оптимальной электробезопасности», которая формируется на вероятностном подходе к оценке явления электротравматизма и на учёте предотвращённых ущербов от гибели людей. В соответствии с этой концепцией в настоящее время необходимо создать на объектах электроэнергетики такую систему, которая бы обеспечивала при заданном уровне электробезопасности минимум приведённых затрат или же при заданных затратах – обеспечивала максимальный уровень электробезопасности.

В Правилах устройства электроустановок (ПУЭ) предусмотрено внедрение устройств защитного отключения по току утечки (УЗО) на объектах экономики, в т.ч. в электроэнергетике, позволяющее повысить эффективность системы безопасности электроустановок. Процесс внедрения УЗО потребует

дополнительных затрат на организацию и управление в создании оптимальных систем электробезопасности. Повышение эффективности системы безопасности электроустановок связано с обеспечением оптимального выбора параметров существующих устройств защиты, т.е. автоматических выключателей, предохранителей и внедряемых УЗО с учётом структуры электрических сетей.

При использовании УЗО не только увеличивается срок службы электроустановок, в т.ч. ЭММ, повышается их эксплуатационная надёжность, но и снижается электротравматизм, предотвращается травматизм и гибель людей вследствие пожаров и возгораний, вызванных повреждением изоляции электроустановок, электропроводок в производственных помещениях и др. Социальный эффект в данном случае можно выразить в виде предотвращённых ущербов [160, 161].

Поскольку социальные и экономические показатели характеризуются тесной взаимосвязью, социальный эффект от разработки и внедрения новой техники следует оценивать экономическими показателями [162, 163].

Ниже рассматривается расчёт социальной эффективности при внедрении УЗО-адаптеров типа ДПА-Т на объектах электроэнергетики Республики Бурятия.

Социальная эффективность внедрения УЗО-адаптеров типа ДПА-Т может быть оценена по методике, изложенной в [161]. В соответствии с данной методикой социальная эффективность средств электрозащиты оценивается числом предотвращённых электропоражений  $n_{\text{пред}}$ :

$$n_{\text{пред}} = N [P(\text{ЭП})_{\text{Б}} - P(\text{ЭП})_{\text{Н}}], \quad (4.2)$$

где  $N$  – число единиц электроустановок;

$P(\text{ЭП})_{\text{Б}}$ ,  $P(\text{ЭП})_{\text{Н}}$  – вероятность электропоражения, приходящаяся на единицу электроустановок соответственно при базовых и новых средствах защиты.

Выполним расчёт вероятности электропоражения при использовании УЗО-адаптера в производственных помещениях и на территории предприятий электроэнергетики при эксплуатации электроустановок (ЭММ).

Вероятность возникновения опасной ситуации в результате прикосновения к корпусам электроустановок (ЭММ), оказавшимся под напряжением:

$$P_{\text{ОСК}} = P_{\text{ОСЭ}} \cdot P_{\text{ПК}}, \quad (4.3)$$

где  $P_{\text{ОСЭ}}$  – вероятность опасного состояния электроустановки (ЭММ),  $P_{\text{ОСЭ}} = 1,93 \cdot 10^{-7}$  (см. Приложение В);

$P_{\text{ПК}}$  – вероятность прикосновения к корпусу, оказавшемуся под напряжением. Значение  $P_{\text{ПК}}^*$ , отнесённое к одному человеку, составляет  $6,66 \cdot 10^{-2}$ , (см. Приложение В).

Для вероятности прикосновения к корпусу по формуле (4.4) необходимо определить значение  $P_{\text{ПК}}$ , отнесённое к одной электроустановке (ЭММ):

$$P_{\text{ПК}} = P_{\text{ПК}}^* \cdot \frac{M}{N_{\text{ЭММ}}} \quad (4.4)$$

где  $M$  – численность среднесписочного состава работающих на объектах электроэнергетики Республики Бурятия по данным [46];

$N_{\text{ЭММ}}$  – число единиц ЭММ, находящихся в эксплуатации на исследуемых объектах.

Учитывая, что в Республике Бурятия проживает около 1 млн. человек, из них  $M$  составляет 20 тыс. человек.

Принимая количество единиц электроустановок ориентировочно равным 75 тыс., из них 15 тыс. – ЭММ, получим:

$$P_{\text{ПК}} = 6,66 \cdot 10^{-2} \frac{20 \cdot 10^3}{15 \cdot 10^3} = 8,88 \cdot 10^{-2}$$

Подставляя численные значения в формулу (4.3), получим:

$$P_{\text{ОСК}} = 1,93 \cdot 10^{-7} \cdot 8,88 \cdot 10^{-2} = 17,1 \cdot 10^{-9}$$

Вероятность электропоражения в результате прикосновения к корпусам электроустановок, оказавшимся под напряжением:

$$P_{\text{ЭПК}} = P_{\text{ОСК}} \cdot P_{\text{СМ}}, \quad (4.5)$$

где  $P_{\text{СМ}}$  – вероятность летального исхода электротравмы составляет  $2,42 \cdot 10^{-5}$  (см. Приложение В).

$$P_{\text{ЭПК}} = 17,1 \cdot 10^{-9} \cdot 2,42 \cdot 10^{-5} = 4,1 \cdot 10^{-13}$$

Вероятность возникновения опасной ситуации в результате прикосновения к токоведущим частям:

$$P_{\text{ОСТ}} = P_{\text{ОСЭ}} \cdot P_{\text{ПТ}}, \quad (4.6)$$

где  $P_{\text{ПТ}}$  – вероятность прикосновения к токоведущим частям.

Учитывая, что соотношение случаев прямого и косвенного контактов по данным (см. таблицу 1.10) составляет (60; 40), можно принять, что

$$P_{\text{ПТ}} = P_{\text{ПК}} \frac{60}{40} \quad (4.7)$$

$$P_{\text{ПТ}} = 8,88 \cdot 10^{-2} \frac{60}{40} = 13,32 \cdot 10^{-2}$$

Тогда

$$P_{\text{ОСТ}} = 1,93 \cdot 10^{-7} \cdot 13,32 \cdot 10^{-2} = 25,7 \cdot 10^{-9}$$

Вероятность электропоражения в результате прикосновения к токоведущим частям:

$$P_{\text{ЭПТ}} = P_{\text{ОСТ}} \cdot P_{\text{СМ}}, \quad (4.8)$$

В численном выражении:

$$P_{\text{ЭПТ}} = 25,7 \cdot 10^{-9} \cdot 2,42 \cdot 10^{-5} = 6,2 \cdot 10^{-13}$$

Вероятность электропоражения в результате прямого или косвенного контакта определяется как:

$$P_{\text{ЭП}} = P_{\text{ЭПК}} + P_{\text{ЭПТ}}, \quad (4.9)$$

$$P_{\text{ЭП}} = 4,1 \cdot 10^{-13} + 6,2 \cdot 10^{-13} = 10,3 \cdot 10^{-13}$$

Допустимая вероятность электропоражения в соответствии с [163] определяется по формуле:

$$P_{\text{ЭПдоп}} = \frac{0,1}{N_{\text{ЭММ}}} \quad (4.10)$$

$$P_{\text{ЭПдоп}} = \frac{0,1}{15 \cdot 10^3} = 6,66 \cdot 10^{-6}$$

Поскольку  $P_{\text{ЭП}} < P_{\text{ЭПдоп}}$ , электробезопасность в пределах допустимой величины будет обеспечена.

Для определения числа предотвращённых электротравм в течение года необходимо рассчитать вероятность электропоражения  $P_{\text{ЭПБ}}$ , приходящуюся на одну единицу электроустановок, в т.ч. ЭММ.

Учитывая, что вероятность электропоражения  $P_{\text{ЭПч}}$ , отнесённая к одному человеку на объектах электроэнергетики Республики Бурятия  $P_{\text{ЭПч}} = 13,32 \cdot 10^{-6}$  (см. параграф 3.3), значение  $P_{\text{ЭПБ}}$  может быть найдено по формуле:

$$P_{\text{ЭПБ}} = P_{\text{ЭПч}} \cdot \frac{M}{N_{\text{ЭММ}}} \quad (4.11)$$

В численном выражении:

$$P_{\text{ЭПБ}} = 13,32 \cdot 10^{-6} \frac{20 \cdot 10^3}{15 \cdot 10^3} = 17,76 \cdot 10^{-6}$$



Тогда число электротравм, предотвращённых в течение года в результате внедрения УЗО-адаптеров составит:

$$n_{\text{пред}} = 75 \cdot 10^3 (17,76 \cdot 10^{-6} - 10,3 \cdot 10^{-13}) = 1,3$$

Важнейшим условием, определяющим целесообразность широкого применения устройств электрозащиты на промышленных предприятиях и других объектах, является их экономическая эффективность. Основными факторами экономии, которые могут быть учтены при оценке экономического эффекта, условимся считать:

- снижение годовых потерь в экономике страны в результате предотвращения электротравматизма людей на объектах электроэнергетики;
- снижение годовых ущербов от пожаров по «электрическим причинам» на объектах электроэнергетики.

При расчёте экономического эффекта учитывалось снижение ущерба только от смертельного электротравматизма, т.к. отсутствие статистических данных не позволяет в полной мере оценить экономические последствия электротравматизма с тяжёлым и лёгким исходом.

Расчёт производился в соответствии с методиками [159, 161, 164]. В качестве базовой формулы использовалось следующее выражение:

$$\mathcal{E} = (\Pi - E_H \cdot K) \cdot A, \quad (4.12)$$

где  $\Pi$  – прибыль от реализации новой продукции;

$K$  – удельные капиталовложения на производство новой продукции;

$E_H$  – нормативный коэффициент эффективности (0,15);

$A$  – годовой объём новой продукции в натуральных единицах.

В формуле (4.12) параметр  $\Pi$  определяется совокупностью факторов, снижающих экономические потери при внедрении устройств электрозащиты, который в свою очередь может быть представлен в виде:

$$\Pi = \Pi_i^* - C_i, \quad (4.13)$$

где  $\Pi_i^*$  – предотвращённые годовые потери при внедрении защиты на  $i$ -м объекте, обусловленные снижением материального ущерба в результате предотвращения пожаров по «электрическим причинам» и гибели людей;

$C_i$  – годовые издержки.

Таким образом, формула (4.12) записывается в виде следующего выражения:

$$\Xi = \sum_{i=1}^L [\Pi_i^* - (E_H \cdot K_i + C_i)] \cdot L, \quad (4.14)$$

где  $K_i$  – капитальные вложения на внедрение защиты на  $i$ -м объекте;

$L$  – количество объектов защиты, равное количеству защитных аппаратов.

В соответствии с [160, 163] формула (4.14) может быть представлена в виде:

$$\Xi = \{ \Pi_{\text{ПОЖ}} \cdot f \cdot K_1 \cdot K_2 + U [P(\text{ЭП})_Б - P(\text{ЭП})_Н] \cdot h + E_H (K_Б - K_Н) + (И_Б - И_Н) \} \cdot L, \quad (4.15)$$

где  $\Pi_{\text{ПОЖ}}$  – материальные потери от пожара на объекте;

$f$  – вероятность возникновения пожара;

$K_1$  – коэффициент, учитывающий долю пожаров по электрическим причинам в общем их количестве (для Республики Бурятия по данным МВД  $K_1 = 0,5$ );

$K_2$  – коэффициент, учитывающий долю пожаров по причине коротких замыканий и токов утечки ( $K_2 = 0,7$ );

$U$  – экономический ущерб от смертельной электротравмы;

$h$  – количество людей, защищаемых аппаратом защиты, т.е. число работающих (ориентировочно  $h = 1$ );

$P(\text{ЭП})_Б$ ,  $P(\text{ЭП})_Н$  – вероятность электропоражения при базовых и новых средствах защиты, отнесённая к одному человеку;

$I_Б$ ,  $I_Н$  – эксплуатационные затраты при базовых и новых средствах защиты;

$K_Б$ ,  $K_Н$  – капиталовложения при базовых и новых средствах защиты.

Для выполнения практических расчётов по полученному выражению (4.15) введём следующие допущения:

1. При определении значения  $\Pi_{\text{ПОЖ}}$  руководствуясь рекомендациями [164] и статистическими данными [165], примем  $\Pi_{\text{ПОЖ}} = 27,42 \cdot 10^3$  руб. и  $f = 153 \cdot 10^{-4}$ .

2. При оценке среднестатистического материального ущерба от одной электротравмы с летальным исходом возможно два подхода. По данным [8] расчётное значение ущерба оценивается 128,425 тыс.руб., а по данным [161] эта величина принимается значительно ниже  $У = 75$  тыс.руб. Отметим, что ущерб, рассчитанный по [8] учитывает динамику изменения национального дохода и среднегодового вклада работающего. Эта величина переменная и изменяется ежегодно, имея общую тенденцию к увеличению. Примем расчётное значение ущерба равное  $У = 100$  тыс.руб., дающее минимальный экономический эффект.

3. При отсутствии базового варианта капиталовложение  $K_Б$  принимается равным нулю. По аналогичным соображениям эксплуатационные затраты  $I_Б$  и  $I_Н$  в расчете равны нулю.

4. Капиталовложение  $K_Н$  на создание новой электрозащиты приравнивается оптовой цене защитного аппарата, равной 760 руб.

5. С учётом того, что значение  $P(\text{ЭП})_Н \ll P(\text{ЭП})_Б$ , величиной  $P(\text{ЭП})_Н$  пренебрегаем.

6. Число защитных аппаратов  $L$  было принято равным  $L = 15 \cdot 10^3$ .

Подставляя числовые значения в выражение (4.13), получим:

$$\begin{aligned} \text{Э} = [27,42 \cdot 10^3 \cdot 153 \cdot 10^{-4} \cdot 0,5 \cdot 0,7 + 100 \cdot 10^3 (13,32 \cdot 10^{-6} \cdot 1) - 0,15 \\ \cdot 760] \cdot 15 \cdot 10^3 = 592,4 \cdot 10^3 \text{ руб.} \end{aligned}$$

При этом расчётный предотвращённый ущерб на объектах электроэнергетики Республики Бурятия в результате внедрения УЗО-адаптеров в количестве  $15 \cdot 10^3$  составит как минимум 667,4 тыс.руб.

#### 4.4 Выводы

1. Выполнена классификация современных УЗО, выпускаемых отечественной промышленностью с целью возможности использования для защиты электрических мобильных машин при одиночной и групповой эксплуатации.

2. В результате анализа структуры питающих сетей при эксплуатации электроустановок определена целесообразность применения УЗО-адаптеров при установке в питающей сети на каждой ЭММ для более эффективной защиты. Уставка срабатывания УЗО-адаптера при индивидуальной работе ЭММ составляет 30мА.

3. Разработано устройство защитного отключения (УЗО-адаптер) типа ДПА-Т для индивидуальной защиты ЭММ, подключенных к трехфазной системе питания напряжением 380В с уставкой срабатывания 30 мА.

4. Проведены экспериментальные исследования работоспособности УЗО-адаптера в научно-исследовательской лаборатории на испытательном стенде по проверке эксплуатации УЗО.

5. Количественная социальная и экономическая эффективность использования УЗО-адаптеров в качестве защиты электрических мобильных машин, показывает, что установка такого аппарата в питающих сетях при эксплуатации ЭММ в помещениях и на территории электроэнергетических предприятий Республики Бурятия позволит предотвратить в год одну электротравму и снизить потери на объектах экономики как минимум на 667,4 тыс. руб. и получить экономический эффект около 592,4 тыс. руб.

6. Повышение уровня безопасности эксплуатации ЭММ может быть достигнуто за счёт сочетания основных и дополнительных мероприятий по электробезопасности, т.е. при создании безопасных условий труда в соответствии с разработанными техническими средствами защиты.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Интенсификация производственных процессов связана с широким внедрением в эксплуатацию электрических мобильных машин (ЭММ), которые используются при выполнении разнообразных операций, создающих условия повышенной опасности электротравмирования. Поэтому применение этой машины представляет сложную социально-технологическую систему.

2. Разработанные в диссертации математические методы анализа обеспечения безопасности позволяют установить количественные статистические и функциональные связи комплекса признаков, факторов и параметров, отражающих особенности эксплуатации ЭММ. Полученные данные дают возможность выполнить многокритериальное прогнозирование значимых признаков, характеризующих возникновение и развитие электроопасной ситуации при использовании ЭММ.

3. В результате математического моделирования выявлены наиболее значимые факторы, являющиеся показателями состояния системы безопасности, отражающие закономерности ее функционирования.

4. На основе анализа и моделирования травмоопасных ситуаций при эксплуатации ЭММ получена оценка уровня опасности электропоражения, которая составляет  $13,32 \cdot 10^{-6}$ , что превышает рекомендуемую норму уровня электробезопасности ( $1 \cdot 3 \cdot 10^{-6}$ ) более чем в 4 раза.

5. Исходя из проведенных исследований сформированы основные этапы оптимизации системы безопасности ЭММ, определена структура построения программно-целевого управления обеспечением безопасности.

6. Результаты теоретических и экспериментальных исследований подтвердили перспективность рекомендуемых и экономически целесообразных средств обеспечения безопасности ЭММ. При этом первоочередное значение имеет создание системы электробезопасности, основным элементом которой является УЗО, в частности, переносные УЗО-вилки, УЗО-адаптеры, обеспечивающие надежную защиту при возникновении различных травмоопасных ситуаций.

7. Социальная эффективность при внедрении УЗО-адаптеров на объектах электроэнергетики Республики Бурятия характеризуется количеством предотвращенных электротравм, равным 1,3, при этом экономическая эффективность составляет 592,4 тыс. руб., а предотвращенный ущерб – 667,4 тыс. руб.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Осика, Л. К. Технологические особенности электроэнергетики и модели либерализованных рынков электроэнергии [Текст] / Л. К. Осика // Промышленная энергетика. – 2008. – № 4. – С. 2-10.
2. Энергобаланс производства и потребления электроэнергии [Текст] // СМИ РАО «ЕЭС России». - М.: Статистика, 2008.
3. Никольский, О. К. Проблема электрической и пожарной безопасности электроустановок инфраструктуры городов и населенных пунктов [Текст] / О. К. Никольский, Т. В. Еремина // Электроэнергетика в сельском хозяйстве: материалы Международной научно-практической конференции. – Новосибирск: Россельхозакадемия, 2009. – С. 24-33.
4. Манойлов, В. Е. Проблемы электробезопасности [Текст] / В. Е. Манойлов. – М.: Госэнергоиздат, 1961. – 292 с.
5. Якобс, А. И. Электробезопасность в сельском хозяйстве [Текст] / А. И. Якобс, А. В. Луковников. – М.: Колос, 1981. – 240 с.
6. Луковников, А. В. Вероятностный подход к решению вопросов электробезопасности в сельских электроустановках и некоторые задачи исследований [Текст] / А. В. Луковников, С. И. Коструба, А. И. Якобс // Докл. МИИСП. - М., 1971. – Т. 7, вып. 3. – С. 56-65.
7. Манойлов, В. Е. Основы электробезопасности [Текст] / В. Е. Манойлов. – Л.: Энергия, 1985. – 344 с.
8. Никольский, О. К. Основы создания оптимальных систем обеспечения электробезопасности людей при эксплуатации электроустановок сельскохозяйственного назначения 380В [Текст]: автореферат дис. на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук / О. К. Никольский. - М.: ВИЭСХ, 1979. – 45 с.
9. Сидоров, А. И. Теория и практика системного подхода к обеспечению электробезопасности на открытых горных работах [Текст]: автореферат дис. на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук / А. И. Сидоров. – Кемерово: Изд-во Кузб. гос. техн. ун-та, 1994. – 38 с.

10. Щуцкий, В. И. О нормировании допустимых для организма человека токов [Текст] / В. И. Щуцкий, А. И. Сидоров // Известия вузов энергетики. – 1980. – № 2. – С. 33-36.
11. Якобс, А. И. О нормировании уровня электробезопасности и допустимого напряжения прикосновения [Текст] / А. И. Якобс, С. И. Коструба // Электричество. – 1978. – № 1. – С. 58-60.
12. Найфельд, М. Р. Заземление, защитные меры электробезопасности [Текст] / М. Р. Найфельд. – М.: Энергия, 1971. – 115 с.
13. Якобс, А. И. Теория и методы расчета заземлителей, работающих при токах промышленной частоты [Текст]: автореф. дис. на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук / А. И. Якобс. – М.: МЭИ, 1969. – 61 с.
14. Водяницкий, Ю. Г. Характеристики и рекомендации по применению устройств защитного отключения ЗОУП-25 [Текст] / Ю. Г. Водяницкий // Техника в сельском хозяйстве. – 1979. – № 4. – С. 34-37.
15. Ревякин, А. И. Обоснование предельных уставок унифицированного ряда устройств защитного отключения для сетей с заземлённой нейтралью [Текст] / А. И. Ревякин // Тр./Моск. энерг.ин-т. Изд-во МЭИ – М., 1977. – Вып. 342. – С. 87-94.
16. Афанасьева, Е. И. Критерии выбора величины тока уставки защитного отключения [Текст] / Е. И. Афанасьева, А. Н. Стрёмовский // Электротехническая промышленность. Серия: Бытовая электротехника. – 1984. – № 2. – С. 3-5.
17. Сошников, А. А. Электропожарозащита [Текст] / А. А. Сошников, Т. В. Еремина // Сельский механизатор. – 1988. – № 10. – С. 21-23.
18. Аракелян, М. К. Электробезопасность в жилых зданиях [Текст] / М. К. Аракелян, Л. И. Вайнштейн. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 112 с.
19. Степанов, Н. М. Травматизм при эксплуатации энергоустановок [Текст] / Н. М. Степанов // Безопасность жизнедеятельности. – 2005. – № 8. – С. 6-14.
20. Супаков, Н. К. Как оценить безопасность производства, безопасность эксплуатации машин [Текст] / Н. К. Супаков // Электробезопасность. – М., 1971. – С. 36-39.



21. Ванаев, В. С. Исследование электробезопасности ручных машин [Текст] / В. С. Ванаев, А. Ф. Козьяков, В. В. Тупов // Безопасность жизнедеятельности. – 2006. – № 7. – С. 11-15.
22. Беляев, Л. Реформа электроэнергетики России: минусы без плюсов [Текст] / Л. Беляев // Энергоинфо. – 2007. – № 4. – С. 3-7.
23. Спельман, Е. П. Техника безопасности при эксплуатации средств малой механизации [Текст] / Е. П. Спельман. – М.: Стройиздат, 1987. – 224 с.
24. Герман, З. Я. Применение ручного механизированного инструмента [Текст] / З. Я. Герман, В. С. Савин. – Л.: ЛДНТП, 1984. – 24 с.
25. Федеральная программа по улучшению условий и охраны труда на 2011-2015 гг. [Текст] // Охрана труда. – 2010. – № 3. – С. 3-15.
26. Христофоров, Е. Н. Травматизм операторов мобильных машин в АПК [Текст] / Е. Н. Христофоров // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2007. – № 2. – С. 20-22.
27. Топалкароев, А. Т. Комплексная оценка производственной опасности и вредности по измерению величин энтропии процесса [Текст] / Топалкароев А. Т. // Сб. науч. работ. – Новосибирск, 1974. – С. 31-36.
28. Фролов, К. В. Вибрация – друг или враг? [Текст] / К. В. Фролов. – М.: Машиностроение, 1984. – 144 с.
29. Тимофеева, И. Г. Обеспечение безопасных условий труда в электроэнергетике при использовании средств малой механизации: дис. ... док.тех.наук [Текст]: 05.26.01 / Тимофеева Ирина Георгиевна. – Челябинск, 2013. – 298 с.
30. Манойлов, В. Е. Электричество и человек [Текст] / В. Е. Манойлов. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 224 с.
31. Князевский, Б. А. Некоторые вопросы нестационарных электроустановок и безопасность их работы [Текст] / Б. А. Князевский // Доклад, обобщающий опубликованные работы автора, представленные на соискании ученой степени доктора технических наук. – М.: Моск. энергет. ин-т, 1967. – 61с.

32. Никольский, О. К. Электробезопасность России на рубеже XXI века [Текст] / О. К. Никольский // Вестник Алт. гос. тех. ун-та им. И. И. Ползунова. – 2000. – № 3. – С. 11-16.
33. Чиркова, И. Г. Анализ электропотребления в сельском хозяйстве [Текст] / И. Г. Чиркова // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2007. – С. 13-14.
34. Архангельский, В. С. Электроэнергетика – комплекс общегосударственного значения [Текст] / В. С. Архангельский // Экономист – 2004. – №12. – С. 30-41
35. Российский статистический ежегодник. 2015: статистический сборник / Росстат. – М. 2015. – 728 с.
36. Безопасность ручных машин и их классификация [Текст] / В. С. Ванаев, Я. Г. Готлиб, А. Ф. Козьяков и др. // Безопасность жизнедеятельности. – 2006. – №5. – С. 6-16.
37. Макаров, А. В. Электроэнергетика России: производственные перспективы и хозяйственные отношения [Текст] / А. В. Макаров // Общество и экономика. – 2003. – № 9. – С. 67-91.
38. Калинин, А. Ф. Критерии оценки электробезопасности ручных машин [Текст] / А. Ф. Калинин, Т. В. Еремина, А. П. Шматко // Научная дискуссия: вопросы технических наук: материалы XVII международной заочной научно-практической конференции. – М.: Международный центр науки и образования, 2013. – С. 103-107.
39. ГОСТ 12.1.003-74. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 8 с.
40. Правила устройства, эксплуатация и безопасность электроустановок [Текст]: нормативно-технический сборник. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2004. – 840 с.
41. ГОСТ 12.1.038-01. ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 8 с.
42. Правила устройства электроустановок [Текст] / Министерство энергетики Российской Федерации. – 7-е изд. – М.: Энергосервис, 2002. – 279 с.
43. Гордон, Г. Ю. Электротравматизм на производстве [Текст] / Г. Ю. Гордон, В. И. Филиппов, З. А. Яроченко. – Л: Лениздат, 1973. – 214 с.

44. Гордон, Г. Ю. Электротравматизм и его предупреждение [Текст] / Г. Ю. Гордон, Л. И. Вайнштейн. – М., Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.
45. Савочко, Е. В. Анализ причин и профилактики электротравматизма [Текст] / Е. В. Савочко // Промышленная энергетика. – 1974. – № 9. – С. 32-34.
46. Условия труда, производственный травматизм. 2015 [Текст]: статистический сборник. – М.: Статистика, 2015. – 547 с.
47. Труд / Россия в цифрах 2007 [Текст]: Статистический справочник / Госкомстат России. – М.: 2007. – 568 с.
48. Медведев, В. Т. Травматизм в электроэнергетике [Текст] / В. Т. Медведев, А. В. Каралюнец, Ю. И. Жуков // Безопасность жизнедеятельности. – 2005. – №5. – С. 2-8.
49. Allmann, S. Electrunfalle im Haushalt / S. Allmann // Elek-Pract. – 1983. – Т. 37, N 8. – P. 257-260.
50. Zentralstatistik elektrischer Unfälle für das Jahr 1981 // Elektrotechn und Maschinenbau. – 1982. – Т. 99, N 8. – P. 382-384.
51. Buchler, O. Unfälle an elektrischen Starkstromanlagen in der Schweiz in den Jahren 1982 bis 1984. / O. Buchler // «Bull Schweiz elektrotechn ver». – 1985. – Т. 76, N 23. – P. 1381-1389.
52. Еремина, Т. В. Анализ электротравматизма на объектах электроэнергетики [Текст] / Т. В. Еремина, А. Л. Гармаев, А. Ф. Калинин // Вестник ВСГУТУ. – 2016. – № 3. – С. 28-31.
53. Безопасность производственных процессов [Текст] / под общ. ред. С. В. Белова. – М.: Машиностроение, 1985. – 448 с.
54. Рофе, А. И. Научная организация труда [Текст] / А. И. Рофе. – М.: Изд-во «МИК», 1978. – 173 с.
55. Якобс, А. И. Развитие научных основ электробезопасности в сельском хозяйстве [Текст] / А. И. Якобс // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1977. – № 9. – С. 23-27.
56. Никольский, О. К. Системы обеспечения электробезопасности в сельском хозяйстве [Текст]. – Барнаул: Алт. кн. изд., 1977.-192с.

57. Белов, П. Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере [Текст] / П. Г. Белов. – М.: Изд. Академия, 2003. – 512 с.
58. Безопасность жизнедеятельности с основами экологии и охраны природы [Текст]: учебное пособие: в 2 ч. / В. В. Егоров, В. А. Басуров, В. И. Вавилин и др. – Нижний Новгород: ННГТУ, 1996. – 376 с.
59. Бабский, Е. Б. Физиология человека [Текст] / Е. Б. Бабский. – М.: Медицина, 1976. – 269 с.
60. СанПиН 2.2.2.540-96. Гигиенические требования к ручным инструментам и организации работ: утв. и введ. в д. 04.07.1996. – М.: Инф. изд. центр Минздрава России, 1997. – 36 с.
61. Козлов, В. Н. Физиология и психология труда. Влияние производственных факторов на физиологическую работоспособность организма и тяжести труда [Текст] / В. Н. Козлов // Саратов: Изд-во СПИ, 2003. – 236 с.
62. Карякин, Р. Н. Нормативные основы устройства электроустановок [Текст] / Р. Н. Карякин. – М.: Энергосервис, 1999. – 385 с.
63. Копылов И. П. Электрические машины [Текст] / И. П. Копылов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.
64. Быковский, И. И. Основы конструирования вибробезопасных ручных машин [Текст] / И. И. Быковский, Б. Г. Гольдштейн. – М.: Машиностроение, 1982. – 224 с.
65. Микулинский, А. М. Воздействие локальной вибрации и вопросы виброзащиты [Текст] / А. М. Микулинский, Л. С. Шейман, Т. М. Разюкович. – Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1983. – 176 с.
66. Интегральная гигиеническая оценка производственной среды [Текст] // Актуальные теоретические проблемы гигиены труда: сб. науч. тр. / НИИ АМН СССР, 1978. – 126 с.
67. Шубов, И. Г. Шум и вибрация электрических машин [Текст] / И. Г. Шубов. – Л.: Энергия, 1977. – 200 с.
68. ГОСТ 12.1.003-99. ССБТ. Шум. Общие требования безопасности. – М.: Изд-во стандартов, 1999. – 8 с.

69. ГОСТ Р 2.2.755-99. Гигиенические критерии оценки и классификация условий труда по показателям вредности и опасности факторов производственной среды, тяжести и напряжённости трудового процесса. – М.: Минздрав России, 1999. – 192 с.
70. Санитарные нормы вибрации рабочих мест № 3044. – М: Минздрав СССР, 1984. – 20 с.
71. Белов, П. Г. Моделирование опасных процессов в техносфере [Текст] / П. Г. Белов. – М.: Изд-во Академии гражданской защиты МЧС РФ, 1999. – 124 с.
72. Белов, П. Г. Теоретические основы системной инженерии безопасности [Текст] / П. Г. Белов. – М.: ГПНТБ, 1996. – 270 с.
73. Долин, П. А. Основы техники безопасности в электроустановках [Текст] / П. А. Долин. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 756 с.
74. Еремина, Т. В. Выбор средств защиты средств малой механизации [Текст] / Т. В. Еремина, А. Ф. Калинин // Безопасность труда в промышленности. – 2014. – №1. – С. 14-16.
75. СНиП 23-05-95. Естественное и искусственное освещение помещений. – М.: Стройиздат, 1995. – 66 с.
76. ГОСТ 12.1.005-99. ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. – М.: Изд-во стандартов, 2000. – 8 с.
77. Никифоров, Л. Л. Безопасность труда. Производственная безопасность [Текст]: учебное пособие / Л. Л. Никифоров, В. В. Персиянов. – М: МГУПБ, 2006. – 257 с.
78. Вентцель, Е. С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология [Текст] / Е. С. Вентцель. – М.: Наука, 1980. – 208 с.
79. Адамов, В. Е. Факторный индексный анализ (Методика и проблемы) [Текст] / В. Е. Адамов. – М.: Политиздат, 1977. – 247 с.
80. Ожогин, А. П. Факторная оценка безопасности [Текст] / А. П. Ожогин // Безопасность труда в промышленности. – 1982. – № 3. – С. 59.
81. Интегральная оценка работоспособности при умственном и физическом труде [Текст]: методические рекомендации. – М.: Экономика, 1976. – 348 с.

82. Вентцель, Е. С. Теория случайных процессов и её инженерные приложения [Текст] / Е. С. Вентцель. – М.: Высшая школа, 2003. – 427 с.

83. О комбинированном действии факторов внешней среды на производстве и их нормирование [Текст] / Н. Ю. Тарасенко и др. // Гигиена и санитария. – 1971. – № 1. – С. 10-13.

84. Решетюк, А. Л. Интегральная гигиеническая оценка производственной среды [Текст] / А. Л. Решетюк // Актуальные теоретические проблемы частной гигиены труда: сб. науч. тр. – М., 1978. – С. 85.

85. Савицкая, Г. В. Анализ хозяйственной деятельности предприятия [Текст] / Г. В. Савицкая. – Минск: ООО «Новое знание», 2001. – 688 с.

86. Тимофеева, И. Г. Интегральный метод оценки влияния производственных факторов на условия труда [Текст] / И. Г. Тимофеева, Т. В. Еремина // Безопасность труда в промышленности. – 2005. – № 3. – С. 48-50.

87. Измеров, Н. Ф. Гигиеническое нормирование факторов производственной среды и трудового процесса [Текст] / Н. Ф. Измеров. – М.: Машиностроение, 1986. – 147 с.

88. Gribson, S. B. Reliability engineering applied to the safety of new projects / S. B. Gribson. – Chem. Eng. Gr. Brit. – 1976. – № 306 – P.273-291

89. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст] / В. Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 1988. – 688 с.

90. Смирнов, Н. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений [Текст] / Н. В. Смирнов, И. В. Дунин-Барховский. – М.: Наука, 1969. – 512 с.

91. Еремина, Т. В. Вероятностная оценка электротравматизма при эксплуатации средств малой механизации [Текст] / Т. В. Еремина, Д. С. Шурыгин, А. Ф. Калинин // Вестник ВСГУТУ. – 2013. – № 2. – С. 196-200.

92. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей [Текст] / Е. С. Вентцель. – М.: Высшая школа, 2003. – 575 с.

93. Кузнецов, В. В. Вербально-числовой метод анализа социально-экономических организационных структур (СЭС). Ч.2. Определение прогнозируемых

значений фазовых переменных (квазирешения) [Текст] / В. В. Кузнецов // Человек и общество: на рубеже тысячелетий: междунаро. сб. науч. трудов №21. – Воронеж, 2003. – С. 11-13.

94. Байд, Д. Научно-техническое прогнозирование для промышленности и правительственных учреждений [Текст] / Д. Байд. – М.: Прогресс, 1972. – 497 с.

95. Лисичкин, В. А. Теория и практика прогнозирования [Текст] / В. А. Лисичкин. – М.: Наука, 1972. – 224 с.

96. Гвишиани, Д. М. Прогностика [Текст] / Д. М. Гвишиани, В. М. Лисичкин. – М.: Знание, 1968. – 91 с.

97. Гмошинский, В. Г. Инженерное прогнозирование [Текст] / В. Г. Гмошинский. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 208 с.

98. Тимофеева, И. Г. Прогнозная оценка условий безопасности средств малой механизации [Текст] / И. Г. Тимофеева, Т. В. Еремина // Безопасность труда в промышленности. – 2008. – № 5. – С. 63-64.

99. Геймейер, Ю. Б. Введение в теорию исследования операций [Текст] / Ю. Б. Геймейер. – М.: Наука, 1971. – 383 с.

100. Еремина, Т. В. Системный анализ техногенной безопасности электроустановок [Текст] / Т. В. Еремина, А. Л. Гармаев // Вестник ВСГУТУ. – 2016. – № 5. – С. 51-55.

101. Рябинин, И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных технических систем [Текст] / И. А. Рябинин. – СПб.: Политика, 2000. – 248 с.

102. Никольский, О. К. Комплексная оценка экономической эффективности мероприятий по электро- и пожаробезопасности [Текст] / Никольский О.К., Москаленко Г.Н., Сошников А.А., Туркин Б.Ф. // Электробезопасность в сельскохозяйственном производстве: науч. тр. – М.: ВИЭСХ, 1984. – Т. 62. – С. 16-21.

103. Гайкович, А. И. Основы теории проектирования сложных технических систем [Текст] / А. И. Гайкович. – СПб.: МОАИНТЕХ, 2001. – 432 с.

104. Введение в математическое моделирование [Текст] / под ред. П. В. Трусова. – М.: Интернет инжиниринг, 2000. – 336 с.

105. Ayoub, M. Integrated safety management information system / M. Ayoub // J. of occup. Accidntns. – 1979 – P. 181-189.

106. Самарский, А. А. Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры [Текст] / А. А. Самарский, А. П. Михайлов. – М.: Физматлит, 2003. – 320 с.
107. Веников, В. А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики) [Текст]. – Изд. 2-е доп. и перераб. / В. А. Веников. – М.: Высшая школа, 1976. – 479 с.
108. Горшков, Ю. Г. Моделирование производственного травматизма [Текст] / Ю. Г. Горшков, Р. Х. Юсупов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2005. – № 2. – С. 27-28.
109. Еремина, Т. В. Метод математического моделирования травмоопасных ситуаций при эксплуатации ручных электрических машин [Текст] / Т. В. Еремина, А. Ф. Калинин // Вестник КрасГАУ. – 2013. – № 11. – С. 292-296.
110. Энергоэнтропийная концепция техногенной опасности электроустановки [Текст] / Т. В. Еремина, А. Ф. Калинин, А. Л. Гармаев // Электробезопасность. – 2016. – С. 32-36.
111. Калинин, А. Ф. Математическое моделирование основных травмоопасных ситуаций при эксплуатации электроустановок [Текст] / А. Ф. Калинин, Т. В. Еремина, А. Л. Гармаев // Проблемы техносферной безопасности: сборник статей II Международной заочной научно-практической конференции. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2016. – 330 с.
112. Altmann, S. Schutzgutekenngrößen als Entscheidungskriterien bei der quantitativen Bewertung der Zuverlässigkeit elektrotechnischer Anlagen "Electric" / S. Altmann. – 10/76. – P. 550-552.
113. Aven T. Reliability and Risk Analysis Elsevier Applied Science, 1992. – P.271-281.
114. О нормировании уровня электробезопасности и допустимого напряжения прикосновения [Текст]: дискуссии // Электричество. – 1978. – № 1. – С. 81-91
115. Халин, Е. В. Новые устройства обеспечения электробезопасности [Текст] / Е. В. Халин, С. И. Коструба // Техника в сельском хозяйстве. – 2006. – № 6. – С. 19-23.
116. Lange, P. Die Möglichkeiten einer verbesserten Sicherheitsbeurteilung für elektrotechnische Anlagen / P. Lange // "Elektric". – 1996. – N 2. – S. 87-89.



117. Слободкин, А. Х. Обзор российского рынка устройств защитного отключения и анализ эффективности осуществляемой ими защиты в сетях напряжением 380/220В [Текст] / А. Х. Слободкин, В. М. Пупин // Промышленная энергетика. – 2000. – № 11. – С. 43-49.

118. Никольский, О. К. Проблемы и перспективы массового применения устройств защитного отключения в России [Текст] / О. К. Никольский, А. А. Сошников, А. В. Полонский // Промышленная энергетика. – 2001. – № 2. – С. 48-50.

119. Клуб директоров: опыт программно-целевого управления предприятием [Текст] / А. Г. Аганберян и др. – М.: Экономика, 1989. – 225 с.

120. Ayoub, M. Integrated safety management information system / J. of occup. accidents. 1979 – № 3. – P. 191-208.

121. Smith, F. A. A scheme for estimating the vertical dispersion of a plum from a near ground level. Proc. of 3 – rd meeting of an expert panel on air pollution modeling / F. A. Smith. – Brussels: NATO/CCMS. – report 14. – 1972. – 119 p.

122. Коструба, С. И. Стохастическое моделирование систем обеспечения электробезопасности [Текст] / С. И. Коструба // Электричество. – 2003. – № 6. – С. 66-70.

123. Якобс, А. И. Развитие системы обеспечения электробезопасности в сельском хозяйстве [Текст] / А. И. Якобс // Электробезопасность в сельскохозяйственном производстве: науч. тр. – М.: ВИЭСХ, 1984. – Т. 62 – С. 3-9.

124. Совершенствование условий и охраны труда в Республике Бурятия [Текст] // под ред. П. А. Чукреева. – Улан-Удэ.: Изд. БНЦ СО РАН, 2004. – 360 с.

125. Дробязко, О. Н. Оптимальные стратегии создания систем безопасности электроустановок и агропромышленного комплекса [Текст]: автореферат дис. на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук / О. Н. Дробязко. – Барнаул: АлтГТУ, 2006. – 44 с.

126. Патент 150476. Российская Федерация. Перфоратор ручной электрический ударного и ударно-вращательного действия [Текст] / Т. В. Еремина, А. Л. Гармаев, А. Ф. Калинин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ВСГУТУ». – 2014, Бюл. № 5.

127. ГОСТ 12.2.013.0-91 (МЭК-745-1-82). ССБТ. Машины ручные электрические. Общие требования безопасности и методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1996. – 88 с.

128. Штефан, Ф. Устройства защитного отключения управляемые дифференциальным током [Текст] / Ф. Штефан. – Прага: IN-EL, 2001.

129. Ослон, А. Б. Обеспечение электробезопасности в установках напряжением до 1000В с заземлённой нейтралью [Текст] / А. Б. Ослон // Промышленная энергетика. – 1982. – № 1. – С. 32-35.

130. Biegelmeier, G. Kann der Fehler strom schutzs chalter die Technik des Berührungs spannungs schutzes revolutionieren? / G. Biegelmeier // Electrotechnik und Maschinendan, 1954. – №4.

131. IEC Standart 364-4-41. Electrical installations of buildings. Part 4: Protection for safety. Chapter 41 // Proctionagainst electric shoks. – 1992 – 10 p.

132. Amendment №1 (July 1982) to Publication 364-5-54. – 1982 –276 p.

133. Монаков, В. К. Электробезопасность [Текст] / В. К. Монаков // Итоги науки и техники ВИНТИ АН СССР. Общие вопросы и теоретические основы электротехники. – М.: 1980. – Т. 1. – 110 с.

134. Логвинов, А. И. Опыт создания серийного производства устройств защитного отключения в России [Текст] / А. И. Логвинов, А. П. Родин // Вестник АлтГТУ им. И. И. Ползунова. – 2000. – № 3. – С. 42-47.

135. ГОСТ Р 50807-95. ССБТ. Устройства защитные, управляемые дифференциальным (остаточным) током. Общие требования и методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1996. – 18 с.

136. МЭК 1008-1-96. Выключатели автоматические, управляемые дифференциальным током бытового и аналогичного назначения без встроенной защиты от сверхтоков.

137. МЭК 1009-1-96. Выключатели автоматические, управляемые дифференциальным током бытового и аналогичного назначения со встроенной защитой от сверхтоков.

138. Грунский, Г. И. Многофункциональность устройств защитного отключения бытового назначения [Текст] / Г. И. Грунский, Г. К. Шварц // Промышленная энергетика. – 2006. – № 6. – С. 42-48.

139. Карякин, Р. Н. Заземляющие устройства электроустановок: справочник [Текст] / Р. Н. Карякин. – М.: Энергосервис, 1998. – 132 с.

140. Jullien, F. Les schemas IT (a neuter isole) des liaisons a la terre en BT / F. Jullien, I. Heritier. – Cahier technique, №178 (Groupe Schneider) // <http://www.schneider-electric.com>

141. Lacroix, B. Les schemas a la terre dans le monde et evolutions / B. Lacroix, R. Calvas. – Cahier technique, №173 (Groupe Schneider) // <http://www.schneider-electric.com>

142. Ожиганов, С. Н. Сравнительный анализ безопасности электрических сетей TN и TT [Текст] / С. Н. Ожиганов // Промышленная энергетика. – 2003. – № 2. – С. 41-44.

143. Лыков, Ю. Ф. Сравнительная характеристика систем заземления сетей напряжением до 1000В [Текст] / Ю. Ф. Лыков // Промышленная энергетика. – 2003. – № 12. – С. 42-47.

144. Карякин, Р. Н. Нормы устройства безопасных электроустановок [Текст] / Р. Н. Карякин. – М.: Энергосервис, 2000. – 453 с.

145. Гольдштейн, Б. Г. Электрические ручные машины с двойной изоляцией [Текст] / Б. Г. Гольдштейн. – М.: Машиностроение. – 1975. – 232 с.

146. Еремина, Т. В. Выбор средств защиты ручных электрических машин [Текст] / Т. В. Еремина, А. Ф. Калинин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2014. – № 2. – С. 14-16.

147. Ерёмина, Т. В. К вопросу о выборе уставок тока срабатывания аппаратов защитного отключения [Текст] / Т. В. Еремина // Науч. техн. бюл. СибИМЭ СО ВАСХНИЛ. – Новосибирск, 1988. – Вып. 1. – С. 65-67.

148. Le Grelle, R. Un dispositif a protection differetielle a haute sensibilite / R. Le Grelle // Equip. ind. – 1974. – N 2. – P. 92-94.

149. May, C. Der optimale Nenn-Auslosefehlerstrom von FI-Schutzschaltem / C. May // Impuls (DDR). – 1978. – Vol. 18, N 1. – P. 30-33.

150. Woodage, R. A. Eliminating the lethal effects of electric shock / R. A. Woodage // *Elec. Times.* – 1978. – №4464. – P. 8-9.

151. Одзаки, Р. Предотвращение неисправной работы и техническое обслуживание защит от тока утечки [Текст] / Р. Одзаки // *Сэйсан то дэнки.* – 1977. – Т. 29, №5. – С. 10-16.

152. Dalziel, C. F. GFCIs & GFRs / C. F. Dalziel // *Prof. Safety.* – 1978. – Vol. 23, N 11. – P. 31-40.

153. Куликов, В. Н. Об электрическом сопротивлении тела человека [Текст] / В. Н. Куликов // *Промышленная энергетика.* – 2005. – № 7. – С. 39-41.

154. Куликов, В. Н. К вопросу о допустимых уровнях кратковременного воздействия на человека электрических токов и напряжений промышленной частоты [Текст] / В. Н. Куликов // *Промышленная энергетика.* – 2006. – № 1. – С. 37-39.

155. Куликов, В. Н. О необходимости пересмотра взглядов на критерии опасности электрического тока для организма человека [Текст] / В. Н. Куликов // *Промышленная энергетика.* – 2001. – № 1. – С. 47-48.

156. МЭК / филиальное отделение организации по стандартизации ISO // *Доки. ИЕС, Публикация 479, 1973 – 158 с.*

157. Патент 168088. Российская Федерация. Трехфазный выключатель дифференциального тока [Текст] / Еремина Т.В., Гармаев А.Л., Калинин А.Ф.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ВСГУТУ». – 2016, Бюл. №2.

158. Афонина, О. А. Социально-экономическая оценка мероприятий по охране труда [Текст] / О. А. Афонина, Н. Н. Колотилов, В. Н. Яров // *Тез. докл. 5-й науч. конф. – Рубежное, 1986.* – С. 42-43.

159. Методические рекомендации по оценке инвестиционных проектов и их отбору для финансирования [Текст]. – М.: Экономика, 1994. – 197с.

160. Никольский, О.К. Системы обеспечения безопасности электроустановок до 1000 В: методические рекомендации по проектированию, монтажу и эксплуатации электрической защиты [Текст] / Никольский О.К., Сошников А.А., Полонский А.В. – Барнаул: Сибирский центр по внедрению устройств защитного отключения, 2001 – 129 с.

161. Методические указания по определению социально-экономической эффективности новой техники [Текст]. – М., Наука, 1982. – 248 с.

162. Критерии и показатели социально-экономической эффективности новой техники [Текст]. – М., Наука, 1982. – 248 с.

163. Сошников, А. А. Оценка эффективности систем комплексной безопасности электроустановок низкого напряжения [Текст] / А. А. Сошников, Т. В. Еремина // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2009. – № 5. – С. 4-6.

164. Инструкция по определению экономической эффективности новой пожарной техники, пожарно-профилактических мероприятий, изобретений и рационализаторских предложений [Текст]. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1980. – 109 с.

165. Пожарная безопасность общественных и жилых зданий: справочник [Текст] / под ред. С. В. Собуря. – М.: Пожкнига, 2007. – 190 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Расчет уравнений регрессии, коэффициентов корреляции и детерминации в зависимости от факторов человеко-машинной системы при эксплуатации электрических мобильных машин

Результаты расчетов по каждой подсистеме вносим в таблицы.

#### 1. Подсистема «человек»

##### 1.1. Фактор – внимание, мышление

$B_i$  – внимание, мышление,

$y_i$  – показатель техногенной опасности развития электротравматизма.

Таблица П.1.1 – Расчет производных величин для определения параметров уравнения связи

$B_i$	10	12	14	15	16	$\sum_i B_i = 67.$
$y_i$	0,41	0,38	0,37	0,25	0,33	$\sum_i y_i = 1,74.$
$B_i^2$	100	144	196	225	256	$\sum_i B_i^2 = 921.$
$B_i \cdot y_i$	4,1	4,56	5,18	3,75	5,28	$\sum_i B_i \cdot y_i = 22,87.$

На основании системы уравнений (2.18) определяем значения коэффициентов  $a_0$  и  $a_1$ .

$$\begin{cases} 5a_0 + 67a_1 = 1,74 \\ 67a_0 + 921a_1 = 22,87 \end{cases}$$

$$a_1 = -0,019; a_0 = 0,606$$

Уравнение связи, которое описывает зависимость техногенной опасности развития электротравматизма от внимания, мышления, согласно (2.17) имеет вид:

$$B_1^ч = 0,606 - 0,019B \quad (\text{П.1.1})$$

Таблица П.1.2 – Расчет исходных данных для определения корреляционного отношения при прямолинейной зависимости

$(B_i - \bar{B})$	-3,4	-1,4	0,6	1,6	2,6
$(B_i - \bar{B})^2$	11,56	1,96	0,36	2,56	6,76
$(y_i - \bar{y})$	0,062	0,032	0,022	-0,098	-0,014
$(y_i - \bar{y})^2$	0,00384	0,00102	0,00048	0,00960	0,00032
$(B_i - \bar{B})(y_i - \bar{y})$	-0,2108	-0,0448	0,0132	-0,1568	-0,0468

$$\bar{B} = \frac{\sum_i B_i}{n} = \frac{67}{5} = 13,4;$$

$$\sum_i (B_i - \bar{B})^2 = 23,2;$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_i y_i}{n} = \frac{1,74}{5} = 0,348;$$

$$\sum_i (y_i - \bar{y})^2 = 0,0152;$$

$$\sum_i (B_i - \bar{B})(y_i - \bar{y}) = 0,446;$$

$$\delta_x = \sqrt{\frac{\sum_i (B_i - \bar{B})^2}{n}} = 2,154$$

$$\delta_y = \sqrt{\frac{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}{n}} = 0,055$$

$$\delta_{xy}^2 = \frac{1}{n} \sum_i (B_i - \bar{B})(y_i - \bar{y}) = 0,089$$

Подставляя соответствующие значение в уравнения (2.19), (2.20) определим коэффициент корреляции и детерминации.

$$r_1^y = 0,75$$

$$d_1^y = 0,56$$

## 2. Подсистема «ЭММ»

### 2.4. Фактор – время работы

$t_i$  – время работы,

$y_i$  – показатель техногенной опасности развития электротравматизма.

Таблица П.1.3 – Расчет производных величин для определения параметров уравнения связи

$t_i$	235	225	235	215	225	$\sum_i t_i = 1135.$
$y_i$	62,553	65,453	68,353	71,253	74,153	$\sum_i y_i = 341,8.$
$t_i^2$	43080	48300	5290	57200	57500	$\sum_i t_i^2 = 259500.$
$t_i \cdot y_i$	13136	14400	15721	17101	18538	$\sum_i t_i \cdot y_i = 76468.$

На основании системы уравнений (2.18) определяем значения коэффициентов  $a_0$  и  $a_1$ .

$$\begin{cases} 5a_0 + 22,5a_1 = 1,74 \\ 22,5a_0 + 101,4a_1 = 7,801 \end{cases}$$

$$a_1 = 1,653; a_0 = -0,292$$

Уравнение связи, которое описывает зависимость техногенной опасности развития электротравматизма от времени работы, согласно (2.17) имеет вид:

$$B_4^{\exists} = -0,292 + 1,653t \quad (\text{П.1.2})$$

Таблица П.1.4 – Расчет исходных данных для определения корреляционного отношения при прямолинейной зависимости

$(t_i - \bar{t})$	-20	-10	0	10	20
$(t_i - \bar{t})^2$	400	100	0	100	400
$(y_i - \bar{y})$	-5,797	-2,897	0,003	2,903	5,803
$(y_i - \bar{y})^2$	33,61	8,39	0	8,43	33,67
$(t_i - \bar{t})(y_i - \bar{y})$	115,94	28,97	0	29,03	116,06



$$\sum_i (t_i - \bar{t})^2 = 0,275;$$

$$\sum_i (y_i - \bar{y})^2 = 0,023;$$

$$\sum_i (t_i - \bar{t})(y_i - \bar{y}) = 0,08;$$

$$\delta_x = 0,235; \quad \delta_y = 0,068; \quad \delta_{xy}^2 = 0,015$$

Подставляя соответствующие значение в уравнения (2.19), (2.20) определим коэффициент корреляции и детерминации.

$$r_2^{\exists} = 0,12;$$

$$d_2^{\exists} = 0,013.$$

### 3. Подсистема «проводимая операция»

#### 3.3. Фактор –организация обеспечения безопасности

$O_3$  – организация обеспечения безопасности,

$y_i$  – показатель техногенной опасности развития электротравматизма.

Таблица П.1.5 – Расчет производных величин для определения параметров уравнения связи

$O_{3i}$	0,58	0,59	0,61	0,63	0,64	$\sum_i O_{3i} = 3,05.$
$y_i$	11	8	5	2	3	$\sum_i y_i = 29.$
$O_{3i}^2$	18,50	19,4	20,25	21,16	22,09	$\sum_i O_{3i}^2 = 1,9.$
$O_{3i} \cdot y_i$	6,38	4,72	3,05	1,26	1,92	$\sum_i O_{3i} \cdot y_i = 17,33.$

Решая систему уравнений (2.18) определяем значения коэффициентов  $a_0$  и  $a_1$ .

$$\begin{cases} 5a_0 + 3,05a_1 = 29 \\ 3,05a_0 + 1,9a_1 = 17,33 \end{cases}$$

$$a_1 = -1,385; \quad a_0 = 0,923$$

Уравнение связи, которое описывает зависимость техногенной опасности развития электротравматизма от организации обеспечения безопасности, согласно (2.17) имеет вид:

$$B_3^0 = 0,923 - 1,385 O_3 \quad (\text{П.1.3})$$

Таблица П.1.6 – Расчет исходных данных для определения корреляционного отношения при прямолинейной зависимости

$(O_{3i} - \bar{O}_3)$	- 0,03	- 0,02	0	0,02	0,03
$(O_{3i} - \bar{O}_3)^2$	0,0009	0,0004	0	0,0004	0,0009
$(y_i - \bar{y})$	5,20	2,20	- 0,80	- 3,80	- 2,80
$(y_i - \bar{y})^2$	27,04	4,84	0,64	14,44	7,84
$(O_{3i} - \bar{O}_3)(y_i - \bar{y})$	- 0,15	- 0,044	0,05	- 0,076	- 0,084

$$\sum_i (O_{3i} - \bar{O}_3)^2 = 0,0026;$$

$$\sum_i (y_i - \bar{y})^2 = 54,8;$$

$$\sum_i (O_{3i} - \bar{O}_3)(y_i - \bar{y}) = 0,36;$$

$$\delta_x = 0,022; \quad \delta_y = 3,311; \quad \delta_{xy}^2 = 0,072$$

Коэффициент корреляции и детерминации определяем используя формулы (2.19) и (2.20).

$$r_3^0 = 0,85;$$

$$d_3^0 = 0,43.$$

#### 4. Подсистема «окружающая среда»

##### 4.2. Фактор – метеорологические условия

$t^\circ$  - метеорологические условия,

$y_i$  – вероятность техногенной опасности развития электротравматизма.

Таблица П.1.7 – Расчет производных величин для определения параметров уравнения связи

$t^\circ_i$	10	11	12	13	15	$\sum_i t^\circ_i = 61.$
$y_i$	11	8	5	4	3	$\sum_i y_i = 31.$
$t_i^{\circ 2}$	100	121	144	169	225	$\sum_i t_i^{\circ 2} = 729.$
$t^\circ_i \cdot y_i$	110	88	60	52	45	$\sum_i t^\circ_i \cdot y_i = 355.$

Решая систему уравнений (2.18) определяем значения коэффициентов  $a_0$  и  $a_1$ .

$$\begin{cases} 5a_0 + 61a_1 = 31 \\ 61a_0 + 759a_1 = 355 \end{cases}$$

$$a_1 = -1,568; a_0 = 2,532$$

Уравнение связи, которое описывает зависимость техногенной опасности развития электротравматизма от метеорологических условий, согласно (2.17) имеет вид:

$$B_2^S = 2,532 - 1,568t^\circ \quad (\text{П.1.4})$$

Таблица П.1.8 – Расчет исходных данных для определения корреляционного отношения при прямолинейной зависимости

$(t_i^\circ - \bar{t}^\circ)$	- 2,2	- 1,2	- 0,2	0,8	2,8
$(t_i^\circ - \bar{t}^\circ)^2$	4,84	1,44	0,04	0,64	7,84
$(y_i - \bar{y})$	4,80	1,80	- 1,20	- 2,20	- 3,20
$(y_i - \bar{y})^2$	23,04	3,24	1,44	4,84	10,24
$(t_i^\circ - \bar{t}^\circ)(y_i - \bar{y})$	- 10,56	- 2,16	0,24	- 1,76	- 8,96

$$\bar{t}^\circ = 12,2; \quad \bar{y} = 6,20$$

$$\sum_i (t_i^\circ - \bar{t}^\circ)^2 = 14,8;$$

$$\sum_i (y_i - \bar{y})^2 = 4,28;$$

$$\sum_i (t_i^\circ - \bar{t}^\circ)(y_i - \bar{y}) = 6,97;$$

$$\delta_x = 1,72; \quad \delta_y = 2,93; \quad \delta_{xy}^2 = 1,38$$

Подставляя соответствующие значения в уравнения (2.19) и (2.20) коэффициент корреляции и детерминации.

$$r_4^S = -0,92;$$

$$d_4^S = 0,85.$$

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Экстраполяционное прогнозирование признаков электротравматизма

На рисунках П.2.1 – П.2.6 приведены динамические ряды основных признаков, характеризующих и отражающих электротравматизм при эксплуатации ЭММ. Динамический ряд  $\Pi_i$  разбивается на две временных области: предпрогнозный период (1-ая обл.) и интервал упреждения (2-ая обл.). Каждая из этих областей соответствует периоду времени, равному 5-ти годам.

Для каждого ретроспективного динамического ряда с помощью метода наименьших квадратов строится кривая  $\varphi(t)$ , которая экстраполируется на прогнозный период. Тренд  $\varphi_i(t)$  по каждому фактору  $\Pi_i$  характеризует общую тенденцию изменения динамического ряда на перспективу.

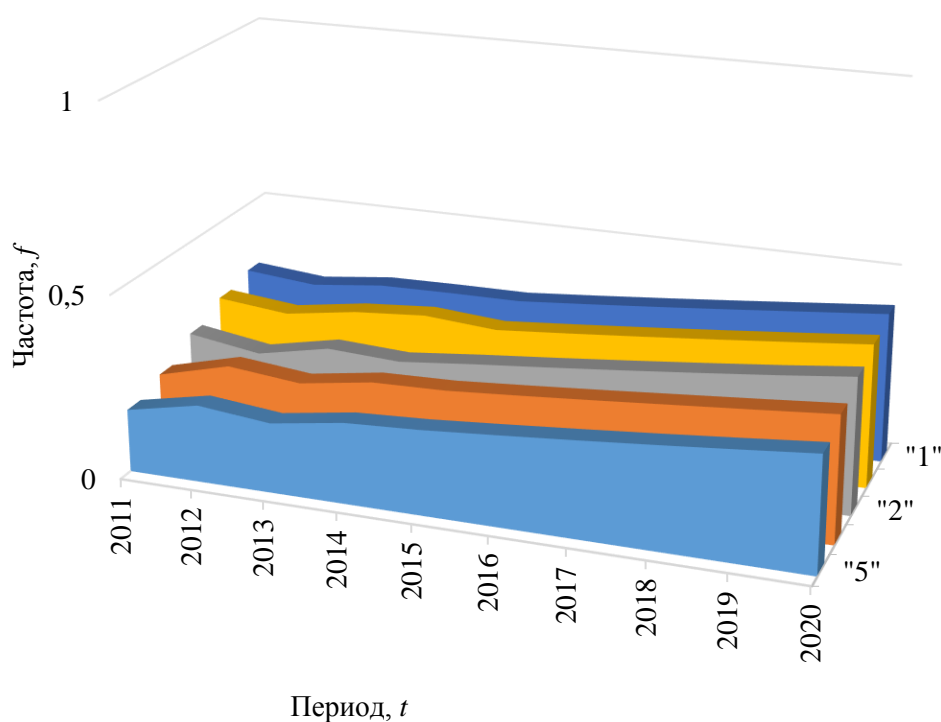


Рисунок П.2.1 – Прогнозирование признака  $\Pi_{B1}$

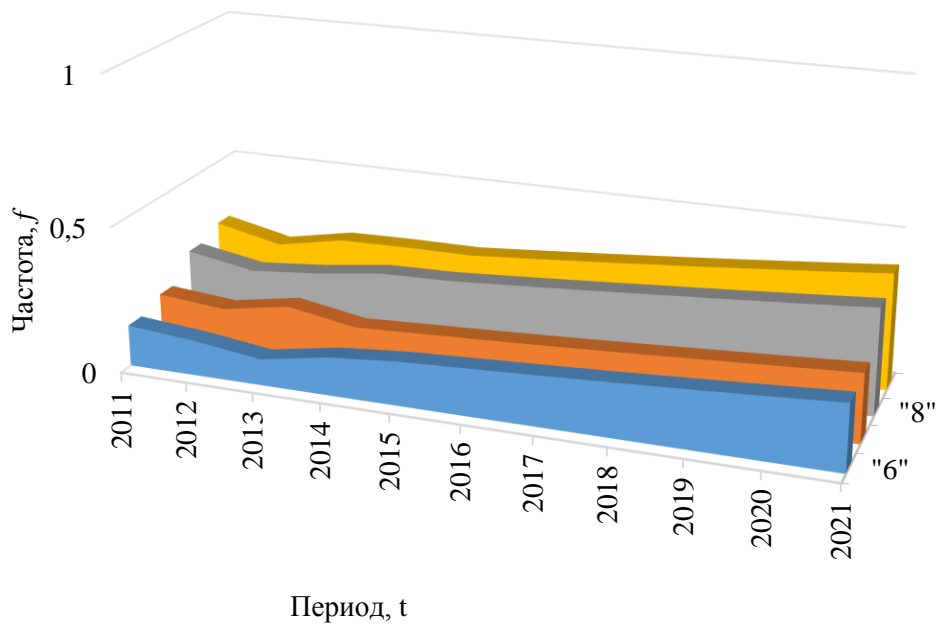


Рисунок П.2.2 – Прогнозирование признака  $P_{C8}$

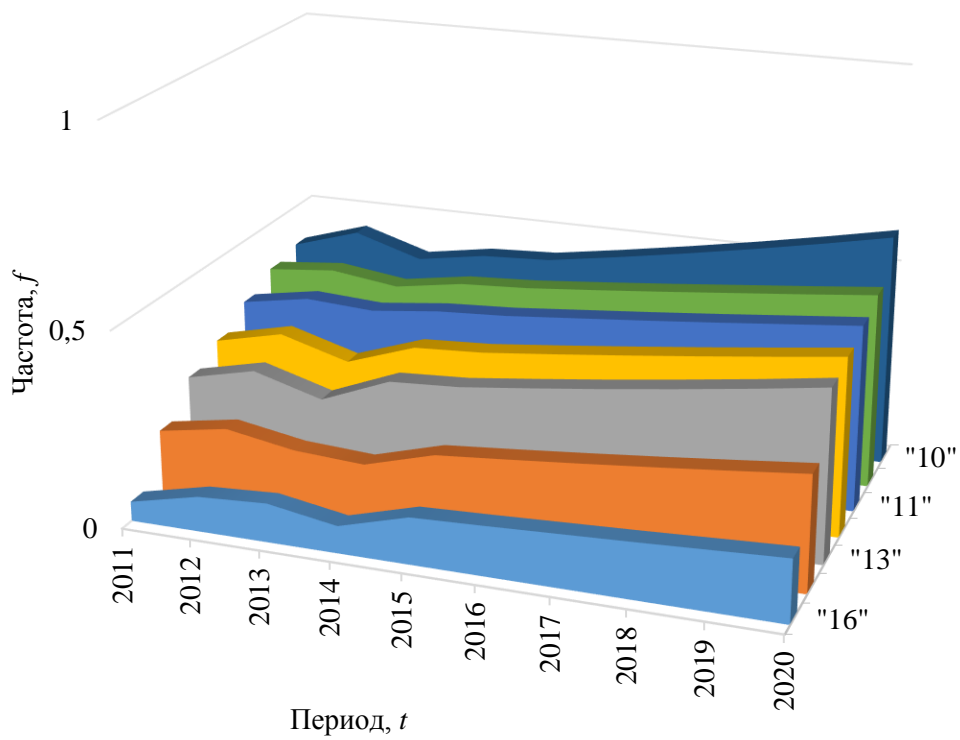


Рисунок П.2.3 – Прогнозирование признака  $P_{D10}$

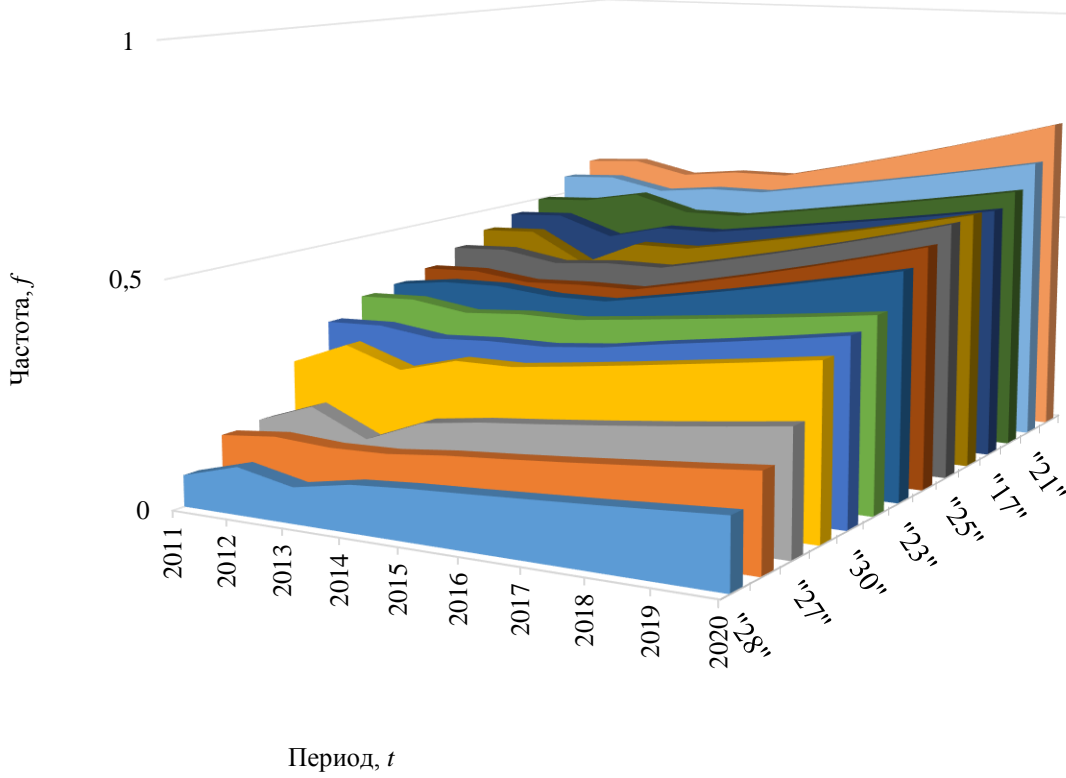


Рисунок П.2.4 – Прогнозирование признака  $P_{T22}$

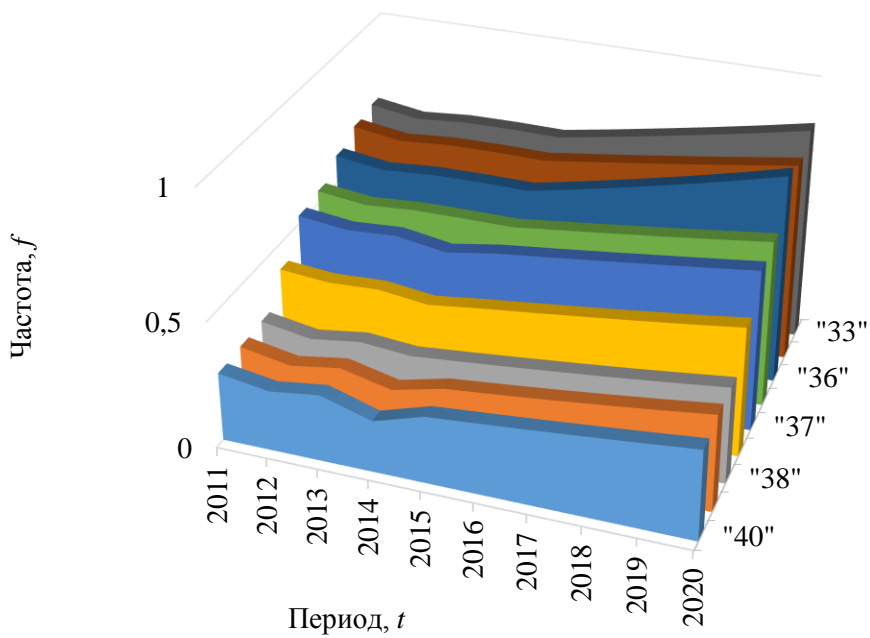


Рисунок П.2.5 – Прогнозирование признака  $P_{P33}$

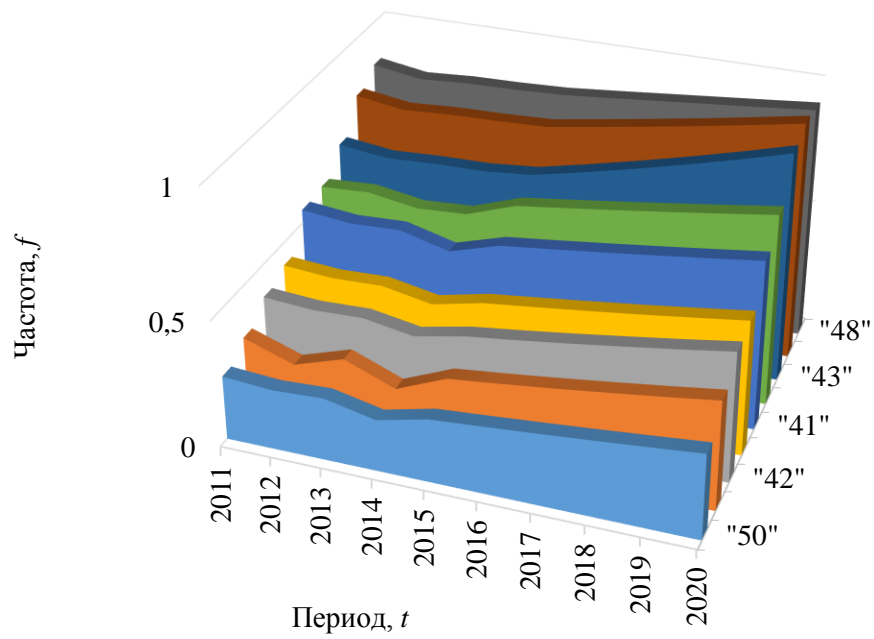


Рисунок П.2.6 – Прогнозирование признака П<sub>Э33</sub>

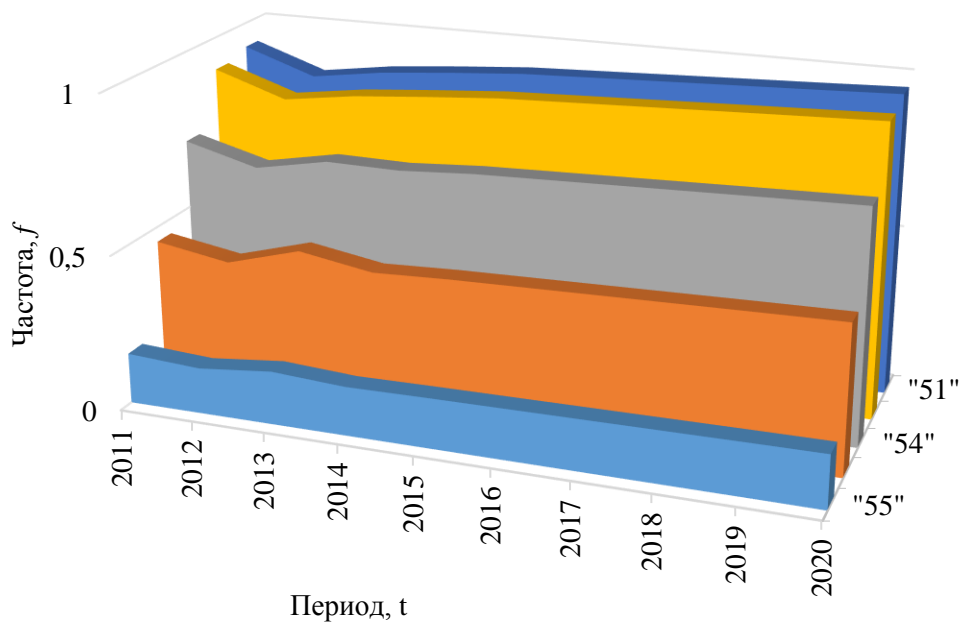


Рисунок П.2.7 – Прогнозирование признака П<sub>О51</sub>

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Математическое моделирование возникновения электроопасных ситуаций в системе безопасности электрических мобильных машин

Моделирование возникновения электроопасных ситуаций выполним с помощью пакета «Анализ данных» в «EXCEL».

Для вычисления коэффициентов корреляции используем процедуру «Корреляция» из пакета «Анализ данных». Результаты корреляционного анализа приведены в таблице П.3.1.

Из анализа данных таблицы П.3.1 можно сделать вывод о том, что наиболее значительное влияние на возникновение электроопасных ситуаций, приводящих к электротравматизму, оказывают факторы подсистемы «машина» (корреляция между электротравматизмом и критерием подобия подсистемы «машина» равна 0,92).

Таблица П.3.1 – Корреляционный анализ

	ЭТ	Ч	М	О	S
ЭТ	1				
Ч	0,47	1			
Э	0,92	0,41	1		
О	0,21	0,48	0,04	1	
S	0,18	0,4	0,03	0,02	1

Используя процедуру «Регрессия» проведем регрессионный анализ и дисперсионный анализ исследуемой зависимости, результаты которого приведены в таблицах П.3.2 и П.3.3.

Таблица П.3.2 – Регрессионный анализ

Регрессионная статистика	
Множественный R	0,99
R-квадрат	0,99
Нормированный R-квадрат	0,99
Стандартная ошибка	0,06
Наблюдения	5



Таблица П.3.3 – Дисперсионный анализ

	df	SS	MS	F	Значимость F
Регрессия	3	128,67	51,25	13921,79	0,007
Остаток	1	0,005	0,005		
Итого	4	128,68			

В таблице П.3.4 дисперсионный анализ, оценивает общее качество полученной модели; ее достоверность по уровню значимости критерия Фишера –  $p$ , который должен быть меньше, чем 0,05 (строка Регрессия, столбец значимость  $F$ , здесь  $p=0,007$ , то есть модель значима) и степень точности описания моделью прогресса –  $R$ -квадрат (таблица П.3.2. Регрессионная статистика, здесь  $K$ -квадрат равен 0,99). Поскольку  $K$ -квадрат больше 0,95, можно говорить о высокой аппроксимации (модель хорошо описывает исследуемое явление). Значения коэффициентов модели определяются из таблицы П.3.4 столбец «Коэффициенты». В столбце  $P$ -значение приводится достоверность отличия соответствующих коэффициентов от нуля. В случаях, когда  $p > 0,05$ , коэффициент может считаться нулевым. Здесь все коэффициенты значимо отличаются от нуля.

Таблица П.3.4 – Значения коэффициентов модели

	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-значение
Y-пересечение	-53,25	0,51	-93,89	0,007
Ч	-0,21	0,01	-18,15	0,035
Э	0,02	7,88	192,13	0,003
О	0,01	0,02	38,23	0,032
S	1,19	0,03	41,53	0,023

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

### Расчет вероятности электропоражения $P(\text{ЭП})$ человека при эксплуатации ЭММ

#### 1. Определение вероятности $P(\text{ЭП})_1$

1.1. Вероятность пробоя электрической изоляции на корпус ЭММ определяется из выражения:

$$P(A_1) = \frac{P(A_K) + P(A_M)}{2}, \quad (\text{П. 4.1})$$

где  $P(A_K) = 0,1 \cdot 10^{-2}$  [56] – вероятность пробоя провода на корпус ЭММ;

$P(A_M) = 15 \cdot 10^{-2}$  [56] – вероятность пробоя фазного провода на металлические части машины.

В таком случае  $P(A_1) = 0,8 \cdot 10^{-2}$

1.2. Вероятность попадания человека под напряжение прикосновения может быть оценена статистически по следующей формуле:

$$P(B_1) \approx \frac{t_{\text{кас}}}{t_{\text{экспл}}} \cdot \frac{n}{N}, \quad (\text{П. 4.2})$$

где  $t_{\text{кас}}$  – среднее время возможного контакта с ЭММ в течение рабочего дня;

$t_{\text{экспл}}$  – среднесуточное время эксплуатации ЭММ;

$n$  – среднее количество эксплуатирующихся ЭММ, находящихся в помещении и др.;

$N$  – средняя численность работающих с ЭММ.

Согласно результатам обследования использования ЭММ принимаем:

$t_{\text{кас}} = 80$  мин.,  $t_{\text{экспл}} = 240$  мин.,  $n = 10$ ,  $N = 50$ .

Тогда 
$$P(B_1) \approx \frac{80}{240} \cdot \frac{10}{50} = 6,66 \cdot 10^{-2}$$

1.3. Согласно [56] условная вероятность электропоражения:

$$P(CM_1) = 1 \cdot 10^{-2}$$

1.4. Вероятность электропоражения

$$P(\text{ЭП})_1 = 0,8 \cdot 10^{-2} \cdot 6,66 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-2} = 5,33 \cdot 10^{-6}$$

## 2. Определение вероятности $P(\text{ЭП})_2$

Из-за отсутствия значений  $P(B_2)$  и  $P(CM_2)$  вероятность  $P(\text{ЭП})_2$  не может быть определена по формуле (3.26). Однако статистически оценить вероятность  $P(\text{ЭП})_2$  возможно с помощью проведенного в диссертации анализа данных по электротравматизму на объектах электроэнергетики в Республике Бурятия. Согласно этим данным (см. таблицу 1.10) соотношение количества производственных электротравм, вызванных событиями ЭП<sub>1</sub> и ЭП<sub>2</sub>, составляет соответственно 4 к 6, т.е. частота этих событий оценивается 40% и 60 %. В этом случае, вводя поправочный коэффициент, равный 1,5, получим:

$$P(\text{ЭП})_2 = 1,5 \cdot P(\text{ЭП})_1 = 1,5 \cdot 5,33 \cdot 10^{-6} = 7,99 \cdot 10^{-6}$$

## 3. Полная вероятность электропоражения равна

$$P(\text{ЭП}) = P(\text{ЭП})_1 + P(\text{ЭП})_2 = 5,33 \cdot 10^{-6} + 7,99 \cdot 10^{-6} = 13,32 \cdot 10^{-6}$$

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д



Филиал ОАО «МРСК Сибири» – «Бурятэнерго»  
670034, Российская Федерация, Республика Бурятия,  
г. Улан-Удэ, пр. 50-летия Октября, д. 28  
тел.: 8 (3012) 34-43-59, факс: 8 (3012) 45-30-73  
E-mail: office@ul.mrsk.ru

19.02.2016 № 12/23/760-исх

На \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

## АКТ

Настоящий акт составлен в том, что соискателем Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления Гармаевым Алексеем Леонидовичем, было проведено комплексное обследование состояния безопасности эксплуатации электрических мобильных машин, применяемых в организации, по следующей программе:

1. Виды (типы) электрических мобильных машин.
2. Характеристика помещений, территорий, участков по степени опасности поражения электрическим током.
3. Описание системы электропотребления (источника питания), типа средств электрической защиты.
4. Характеристика технологии выполняемых работ, применяемых средств индивидуальной защиты.
5. Описание опасных и вредных производственных факторов.

Результаты обследования будут использованы при создании комплексной системы безопасности при использовании электрических мобильных машин.

Начальник ДУЭЭ



Черниговский В.С.

012341 ❁

## ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Документ, подтверждающий использование разработок  
СПРАВКА

Об использовании результатов научно-исследовательской(опытно-конструкторской) работы

Разработки Восточно-Сибирского государственного университета технологий управления  
(наименование вуза)кафедры "Экология и безопасность жизнедеятельности"а именно методика анализа структуры управления безопасностью электрических мобильных  
(полное наименование разработок или перечня разработок)машин на объектах электроэнергетикиВыполненные по заказу  
(хоздоговору, госбюджету, внутриминистерскому(внутриведомственному)заказам, договоруна передачу научно-технических

достижений, договору соцсодружестве; наименование темы; номер и индекс темы; даты начала и окончания" объем затрат на

НИР; № регистрации)

и переданные в электросетевую организацию АО "Улан-Удэ Энерго"  
(наименование организации(предприятия) заказчика)Использованы с января 2016 г. по август 20 16 г. на (в)

(наименование предприятия организации)

Практическое использование разработок обеспечивает оценку состояния безопасности  
эксплуатации электрических мобильных машин  
(охарактеризовать научно-техническую задачу, решаемую с помощью разработок вуза)Область использования: производственные объекты электроэнергетики  
(производственный процесс, проектные разработки, научные исследования и т.д.)

Наименование документов (с указанием номеров и дат), подтверждающих использование

акты передачи

(производственный процесс, проектные разработки, научные исследования и т.д.)

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ НИР

1. Социальный эффект совершенствование структуры безопасности электрических  
(подробно раскрыть конкретный вид эффекта; защита здоровья, охрана окружающей среды,мобильных машин

повышение престижа страны, совершенствование организационных структур управления, развитие науки и научных исследования и т.д.)

2. Фактический экономический эффект от использования результатов НИР достигнут за счёт

сочетание основных и дополнительных мероприятий по электробезопасности мобильных машин с

(количественная характеристика экономии материальных, энергетических и трудовых ресурсов,

экономическим анализом повышения уровня безопасности

сокращение капитальных вложений, повышение качества продукции и т.д.)

и в период использования составил не считался тыс.рублей

Долевое участие ВУЗа в полученном экономическом эффекте составляет \_\_\_\_\_

тыс.рублей

(сумма цифрами и прописью)

## ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ

Результаты НИР планируется к внедрению в составе \_\_\_\_\_ **системы обеспечения безопасности при** \_\_\_\_\_  
(название внедряемого объекта, в создании которого

**эксплуатации электрических мобильных машин** \_\_\_\_\_  
используются результаты НИР)

Вид и объем внедрения \_\_\_\_\_ **методика анализа структуры управления безопасности электрических** \_\_\_\_\_  
(раскрыть рабочую функцию внедряемого объекта)

**мобильных машин на объектах электроэнергетики** \_\_\_\_\_

Где и когда планируется внедрение \_\_\_\_\_ **предприятия электроэнергетики Республики Бурятия** \_\_\_\_\_  
(название предприятия или организации и сроки планируемого внедрения объекта)

По какому плану намечено внедрение \_\_\_\_\_

Документы подтверждающие внедрение результатов НИР, будут представлены разработчику.

Руководитель Государственной инспекции труда -  
главный государственный инспектор труда  
в Республике Бурятия

  
А.И. Пыкин \_\_\_\_\_  
(подпись)  
"27" октября 2016г.  
М.П.

Проректор по научной работе  
Восточно-Сибирского государственного  
университета технологий и управления  
д.т.н., профессор

  
И.И. Сизов \_\_\_\_\_  
(подпись)  
"27" октября 2016г.  
М.П.

Соискатель

А.Л. Гармаев \_\_\_\_\_  
(подпись)



## ПРИЛОЖЕНИЕ Ж



## СПРАВКА

**О внедрении в учебный процесс кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и сельского хозяйства» учебного пособия и методических рекомендаций по анализу структуры управления безопасностью электрических мобильных машин на объектах электроэнергетики**

На кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий и сельского хозяйства» ФГБОУ ВО «ВСГУТУ» с 2016 г. студентами 3 и 4 курсов при изучении дисциплины «Безопасность жизнедеятельности» и выполнении дипломных проектов используются материалы научных исследований соискателя Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления Алексея Леонидовича Гармаева, которые приведены в следующих изданиях:

1. «Вероятностный анализ системы безопасности электроустановок». Учебное пособие, Улан-Удэ, Изд-во ВСГУТУ, 2016г. –76 с.
2. Методические рекомендации по анализу структуры управления безопасностью электрических мобильных машин на объектах электроэнергетики. Улан-Удэ, Изд-во ВСГУТУ, 2016 г. –28 с.

Проректор по учебной работе  
Восточно-Сибирского государственного  
университета технологий и управления  
д.т.н., профессор



П.К. Хардаев

Заведующий кафедрой  
«Электроснабжение  
промышленных предприятий и  
сельского хозяйства»  
к.т.н., доцент

В.В. Данеев

## ПРИЛОЖЕНИЕ И



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего образования«ВОСТОЧНО-СИБИРСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ТЕХНОЛОГИЙ И УПРАВЛЕНИЯ»  
(ВСГУТУ)670013, Республика Бурятия,  
г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В, стр.1  
тел. (301-2) 43-14-15, факс 41-71-50  
e-mail: office@esstu.ruот **13 ДЕК 2016** № **3359/120**  
на № \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе  
Восточно-Сибирского  
государственного университета  
технологий и управления

И.А. Сизов

Дата

**13 декабря 2016 г.**

АКТ

**акт  
проведения лабораторных испытаний устройства защитного  
отключения типа ДПА-Т**

Настоящим актом подтверждаются результаты проведения лабораторных испытаний трехфазного устройства защитного отключения ДПА-Т (УЗО-адаптер), разработанного в Восточно-Сибирском государственном университете технологий и управления соискателем Гармаевым А.Л., к.т.н. Калининым А.Ф. и д.т.н., доцентом Ереминой Т.В. (трехфазный выключатель дифференциального тока).

Испытания проводились по программе, разработанной на кафедре «Экология и безопасность жизнедеятельности».

1. Цель испытаний – проверка соответствия разработанного устройства защитного отключения ДПА-Т требованиям параметров.

2. Результаты исследований:

2.1. Технические характеристики и условия УЗО-адаптера соответствуют требованиям технических параметров.

2.2. Основные параметры УЗО-адаптера:

уставки срабатывания – 30 мА;

время срабатывания – 0,03 с;

напряжение питания –  $380 \pm 11$  В;

частота –  $50 \pm 1$  Гц;

потребляемая мощность – 2 Вт;

ток нагрузки – 16 А;

самоконтроль исправности – соответствует требованиям технических параметров.

Исп.  
тел.

001375



## 3. Заключение.

3.1. Разработанное устройство защитного отключения ДПА-Т в полном объеме соответствует требованиям технических параметров.

3.2. Разработанное устройство защитного отключения ДПА-Т с комплектом технического задания может быть рекомендовано для изготовления опытных образцов изделия ДПА-Т.

Председатель комиссии:



С.Е. Санжиева,  
д.б.н., профессор

Члены комиссии:



Т.В. Ерёмина,  
д.т.н., доцент



И.Г. Тимофеева,  
д.т.н., доцент



А.Л. Гармаев,  
соискатель

## ПРИЛОЖЕНИЕ К

Акционерное  
ОбществоУлан-Удэ  
Энерго670042, Республика Бурятия  
г. Улан-Удэ, ул Жердева, 12  
тел.: 8 (301-2) 43-12-67  
факс: 8 (301-2) 41-56-50  
email: uue@uuenergo.ru

## СОГЛАСОВАНО

Проректор по научной работе  
Восточно-Сибирского государственного  
университета технологий и управления  
д.т.н., профессор  
И.Г. Сизов



## УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора по  
техническим вопросам – главный инженер  
АО «Улан-Удэ Энерго»  
М.Г. Бувалин

Дата «02» июля 2016 г.

## СПРАВКА

**Об использовании результатов научно-исследовательской деятельности и опытно-конструкторской работы соискателя Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления Алексея Леонидовича Гармаева**

Материалы диссертационной работы Гармаева А.Л. «Разработка методических рекомендаций по обоснованию обобщенных требований к устройствам защитного отключения для электрических сетей до 1000 В» внедрены на предприятии АО «Улан-Удэ Энерго».

В результате применения указанных рекомендаций с соответствующими организационными и техническими мероприятиями по использованию высокоэффективного средства защиты: УЗО-адаптер типа ДПА-Т (трехфазный выключатель дифференциального тока), разработанного в Восточно-Сибирском государственном университете технологий и управления соискателем Гармаевым А.Л., к.т.н. Калининым А.Ф. и д.т.н., профессором Ереминой Т.В. на уровне патента, обеспечиваются условия безопасной эксплуатации электрических мобильных машин и других электроустановок.

И.о. начальника отдела производственного  
контроля и охраны труда

С.С. Жигжитов