

*На правах рукописи*



**ГАРМАЕВ Алексей Леонидович**

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

Специальность 05.26.01 – Охрана труда (электроэнергетика)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Улан-Удэ - 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления» на кафедре «Экология и безопасность жизнедеятельности»

Научный руководитель

- доктор технических наук, доцент **Еремина Тамара Владимировна**

Официальные оппоненты:

**Дробязко Олег Николаевич**, доктор технических наук, профессор кафедры «Информатика, вычислительная техника и информационная безопасность» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул.

**Закирова Альфия Резавановна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Техносферная безопасность» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения», г. Екатеринбург.

**Ведущая организация** - Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вятский государственный университет», г. Киров.

Защита диссертации состоится 24 ноября 2017 г., в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.298.05 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ауд. 1007.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» и на официальном сайте ЮУрГУ по адресу: <https://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229805/garmaev-aleksey-leonidovich>

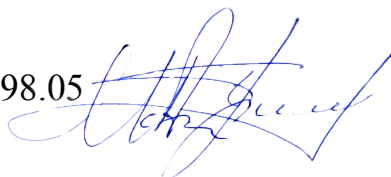
Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, гл. корпус, Ученый совет ЮУрГУ, тел./факс: +7(351)-267-91-23.

E-mail: [grigorevma@susu.ac.ru](mailto:grigorevma@susu.ac.ru).

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.298.05  
доктор технических наук, доцент



М.А. Григорьев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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, натуральных 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.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** кратко изложена актуальность исследования, сформулированы цели и задачи исследования, объект и предмет исследования, научная новизна и практическая значимость.

**В первой главе** приведен анализ состояния безопасности ЭММ, применяемых на объектах электроэнергетики. Проблему безопасности ЭММ необходимо рассматривать комплексно, исходя из анализа развития и использования этих машин в производственном процессе и исследования факторов, доминирующим из которых является электрический фактор.

Быстрое развитие электрификации нашей страны определяется наметившимся с 2000 г. ростом электропотребления и увеличением темпов подъема промышленности и сельского хозяйства и превращение отраслей экономики в высокомеханизованное производство. Но при росте потребления электроэнергии, связанном с расширением производства, в отраслях промышленности наблюдается тенденция повышения электротравматизма, а также и на предприятиях электроэнергетики. За 10-15 лет прошлого века и начала нового тысячелетия в России показатель электротравматизма вырос приблизительно в 1,5 раза, в то время как в других странах он снизился, например, в Великобритании – в 2 раза, в Австрии – в 2,2 раза, в Германии – в 2,1 раза.

Результаты анализа электротравматизма по видам экономической деятельности показывают скачкообразное изменение возникновения несчастных случаев, преобладающее количество их наблюдается в обрабатывающем производстве – 22,8%, а при производстве и распределении электроэнергии – 2,8%

Установлено, что при работе с ЭММ около 34,4% электротравм происходит при непосредственном прикосновении к токоведущим частям,

находящимся под напряжением, в результате прикосновения к открытым токопроводящим частям ЭММ, оказавшимся под напряжением – 16%. Наиболее опасными ситуациями, приводящими к летальному исходу, являются прямое и косвенное прикосновение к электроустановкам находящимся в аварийном состоянии. При этом, рассматривая исход электротравмы как сложное случайное событие, для его оценки в настоящее время широко используются показатели  $P(\text{ЭП})$  – вероятность опасности электропоражения или  $P(\text{ЭБ})$  – вероятность электробезопасности, связанные между собой соотношением  $P(\text{ЭП})=1-P(\text{ЭБ})$ . Данные показатели характеризуют уровень электропоражения или уровень электробезопасности человека.

Применяемые средства электрической защиты, не в полной мере обеспечивают требования электробезопасности при эксплуатации электроустановок. Существующая система зануления, широко используемая в производственных и других условиях, и система заземления не обеспечивают надежную электробезопасность, даже при соответствии их требованиям ПУЭ. Неудовлетворительное рабочее состояние указанных видов защит объясняется значительным разбросом времени срабатывания предохранителей, автоматических выключателей и т.д.

Основными причинами возникновения электротравм при эксплуатации ЭММ являются неудовлетворительная организация работ и недостаточная эффективность средств электрической защиты.

Большой вклад в развитие теории и практики обеспечения безопасности электроустановок внесли ученые Князевский Б.А., Цапенко Е.Ф., Щуцкий В.И., Никольский О.К., Сидоров А.И., Коструба С.И., Карякин Р.Н. и др. В их трудах основой анализа безопасности электроустановок является вероятностная теория причинно-следственных связей возникновения электротравматизма. При этом не отражается многофакторный анализ условий применения электроустановок с оценкой влияния неблагоприятных факторов на состояние системы «человек – электроустановка – окружающая среда».

Основываясь на концепции системного подхода электротравма характеризуется совокупностью взаимодействующих между собой компонентов и связей между ними, являясь образованием четырех составляющих в человеко-машинной системе «Ч-ЭММ-ПО-ОС». Установлено, что электротравма происходит при нарушении взаимосвязей компонентов и является прямым ее следствием. Основой для комплексного анализа системы «Ч-ЭММ-ПО-ОС» с последующей ее оптимизацией, исходя из действующих нормативных параметров, является изучение механизма совокупного взаимодействия факторов, характеризующих каждый компонент системы (рисунок 1). Поэтому анализ каждого фактора, оказывающего влияние на условия эксплуатации ЭММ, является неотъемлемой частью оценки в развитии и создании эффективной системы безопасности.

На основании вышеизложенного сформулированы цель и задачи исследования.

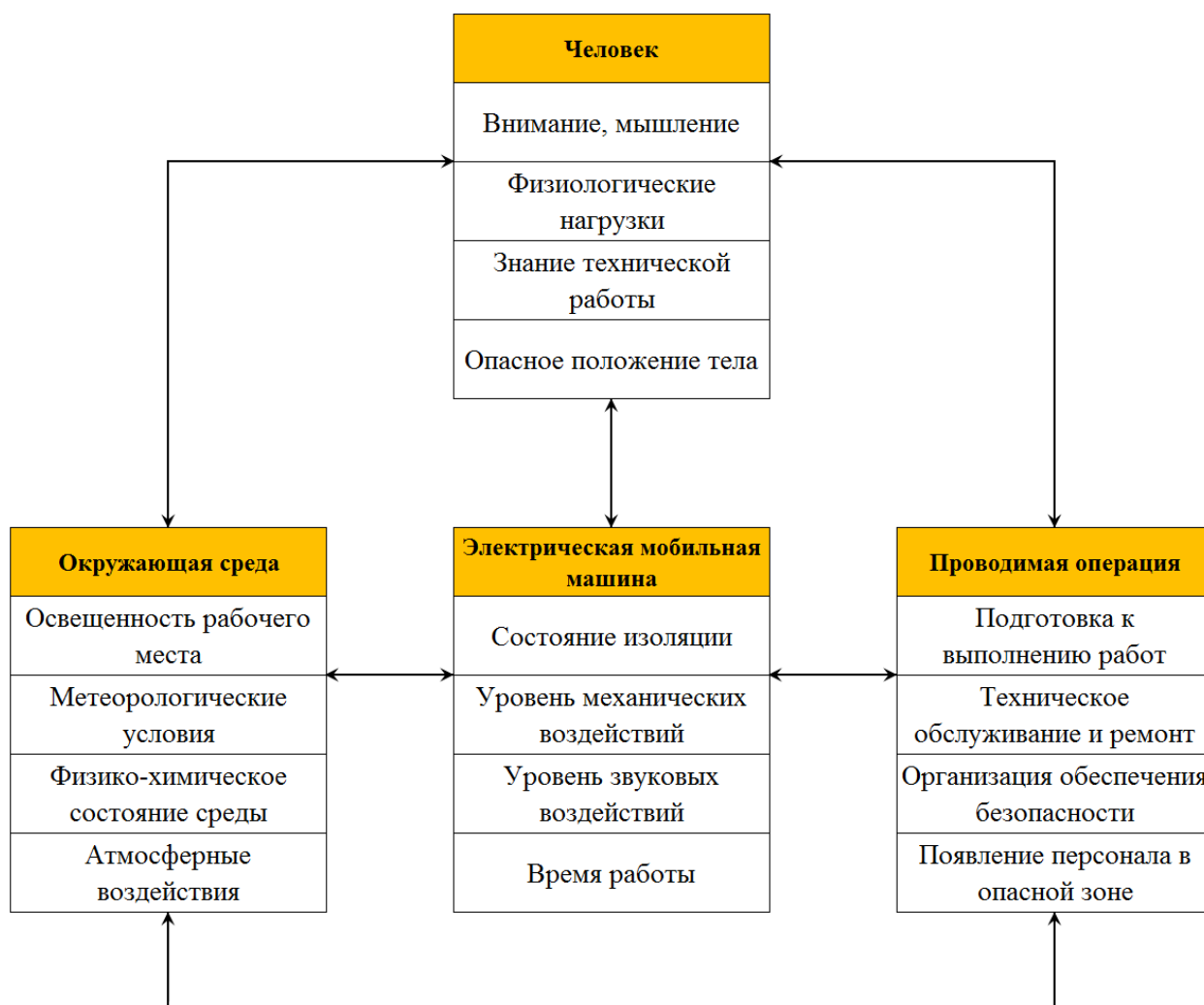


Рисунок 1 – Блок-схема факторов, характеризующих условия эксплуатации ЭММ

**Вторая глава** посвящена разработке математических моделей, позволяющих определить показатели техногенной опасности системы «Ч-ЭММ-ПО-ОС», выделив наиболее значимые факторы подсистем, выполнить прогноз развития электроопасных ситуаций, приводящих к возникновению электротравматизма, при эксплуатации электрических мобильных машин.

Для установления причинно-следственных связей проведен частотный анализ совокупности признаков, характеризующих электротравму. При этом формализованное описание несчастного случая представлено в виде вектора-признака:

$$F = [P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_k], (i=1, \dots, k), \quad (1)$$

где  $P_1, P_2, \dots, P_k$  – введенные признаки.



При формировании модели количественная связь между качественными признаками определена с помощью коэффициента двухфакторной связи

$$r_{\Pi_x\Pi_y} = 1 - \frac{2 - \sum_{i=1}^k (\Pi_x - \Pi_y)}{k} \quad (2)$$

Коэффициент  $r_{\Pi_x\Pi_y}$  имеет пограничные значения: 1 – при полной статистической связи между  $\Pi_x$  и  $\Pi_y$ , 0 – при отсутствии связи.

Исходя из проведенного частотного метода анализа признаков электротравматизма выделены наиболее значимые, отражающие существенные свойства изучаемого явления (таблица 1)

Таблица 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					
3	Использование ЭММ на открытом воздухе.			0,516				
4	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

В диссертации предложена методика интегральной оценки факторов, характеризующих условия применения ЭММ в системе «Ч-ЭММ-ПО-ОС». Эта методика позволяет установить степень влияния различных факторов на состояние системы. Показатель, характеризующий опасное и вредное воздействие факторов, выражается величиной интегральной оценки, определяющей условия труда человека-оператора. В результате расчета

определено какую часть численного приращения функции составляет приращение каждого фактора за анализируемый период. Если  $y = f(\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_m)$  – функция изменения результирующего показателя, тогда функция приращения каждого фактора имеет вид:

$$\Delta y_n = \int_0^1 f_{\Phi_j}^i(\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_m) d\Phi, \quad (3)$$

где  $j=1, 2, \dots, m$  – количество факторов;  $i=1, 2, \dots, n-1$  – количество измерений

Обобщенный показатель совокупного воздействия неблагоприятных факторов на условия эксплуатации ЭММ представляет величину интегрального балла «И».

$$И = \left[ \sum_{j=1}^n \left( \frac{\Phi_i}{\Phi_j} \right)^2 \right]^{0.5} * n^{-0.5}, \quad (4)$$

где  $\Phi_i$  – реальное значение  $i$ -го неблагоприятного фактора;  $\Phi_j$  – допустимый уровень фактора по принятой шкале размерности.

На основании уравнения (4) определена количественная оценка взаимосвязи факторов (см. рисунок 2), из которого следует, что важную роль в обеспечении уровня безопасности играют факторы подсистемы «ЭММ», обобщенный интегральный балл составляет  $И^Э = 1,56$  и факторы подсистемы «человек» -  $И^Ч = 1,53$ .



Рисунок 2 – Структурно-логическая блок-схема интегральной оценки факторов условий эксплуатации ЭММ

Результаты интегральной оценки показывают, что прогнозирование, планирование уровня безопасности ЭММ необходимо осуществлять с помощью выбора оптимальных управляемых факторов системы «Ч-ЭММ-ПО-ОС».

Рассматривая во взаимосвязи систему «Ч-ЭММ-ПО-ОС» следует отметить, что техногенная опасность возникает при нарушении этой взаимосвязи и является прямым его следствием. Поэтому для устранения возникновения травмоопасных ситуаций необходимо выявить специфические имманентные свойства компонентов системы, формирующих в той или иной мере опасную ситуацию. Примененный корреляционно-регрессионный анализ позволил дополнить интегральный метод, описать математически и установить корреляционные зависимости степени влияния отдельных факторов на величину показателя техногенной опасности, приводящей к возникновению электротравмирования человека. Для наиболее значимых факторов подсистем «человек», «электрическая мобильная машина», «проводимая операция», «окружающая среда» определены уравнения показателей техногенной опасности при работе ЭММ на основании статистического исследования несчастных случаев.

$$\begin{aligned} B^Ч &= a_1 - b_1 V_1; & B^Э &= a_2 - b_2 Э_4; \\ B^О &= a_3 - b_3 O_3; & B^S &= a_4 - b_4 t^\circ; \end{aligned} \quad (5)$$

где  $V_1$ ,  $Э_4$ ,  $O_3$ ,  $t^\circ$  – соответствующие факторы подсистем (см. рисунок 1);  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_4$  – постоянная величина не связанная с изменением данного фактора;  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$  – средневзвешенный коэффициент соответствующего фактора.

Предлагаемая методика, предназначена для решения задач по оценке безопасности эксплуатации ЭММ, основанная на вероятностном подходе, позволяет установить влияние значимых управляемых факторов при их количественном изменении на величину опасности и выбрать оптимальные по критерию безопасности, в качестве которого принят показатель техногенной опасности возникновения электротравмирования человека, представляющий количественную оценку безопасности.

Важное место в решении проводимых исследований техногенной опасности занимает выполнение сценарного прогнозирования развития электротравматизма и определение его оценки при работе с ЭММ. 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 условиях, в которых эти изменения происходят. 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). С помощью этого сценария выявлена тенденция изменения признаков  $\Pi_i$  возникновения электротравм. Для выделенных благодаря уравнению (1) наиболее значимых признаков, приведенных в таблице 2, получены динамические ряды в виде ломанных

кривых, исходя из уравнения (6) регрессионной зависимости электротравматизма, которые представлены в трехмерном пространстве (рисунок 3). В результате аппроксимации динамических рядов получен тренд  $\varphi(t)$ , показывающий заметное изменение этих рядов (рисунок 4):

$$f_{\Pi_i} = 1 + k_i \cdot \Pi_i \cdot e^{-0.5j}, \quad (6)$$

где  $k$  – постоянная динамического ряда;  $j$  – год прогнозирования.

Таблица 2 – 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

Перенося динамику изменения показаний признаков  $\Pi_{i_{max}}$  на заданный интервал упреждения 5 лет (2016-2020гг.), экстраполируя полученную закономерность  $f(t)$ , выполнен краткосрочный прогноз признаков, представляющих параметрические ряды, наиболее существенно характеризующие электротравматизм при работе с ЭММ. При этом полная совокупность параметрических рядов оценивается как результат многокритериального прогнозирования, являясь его качественной и количественной характеристикой.

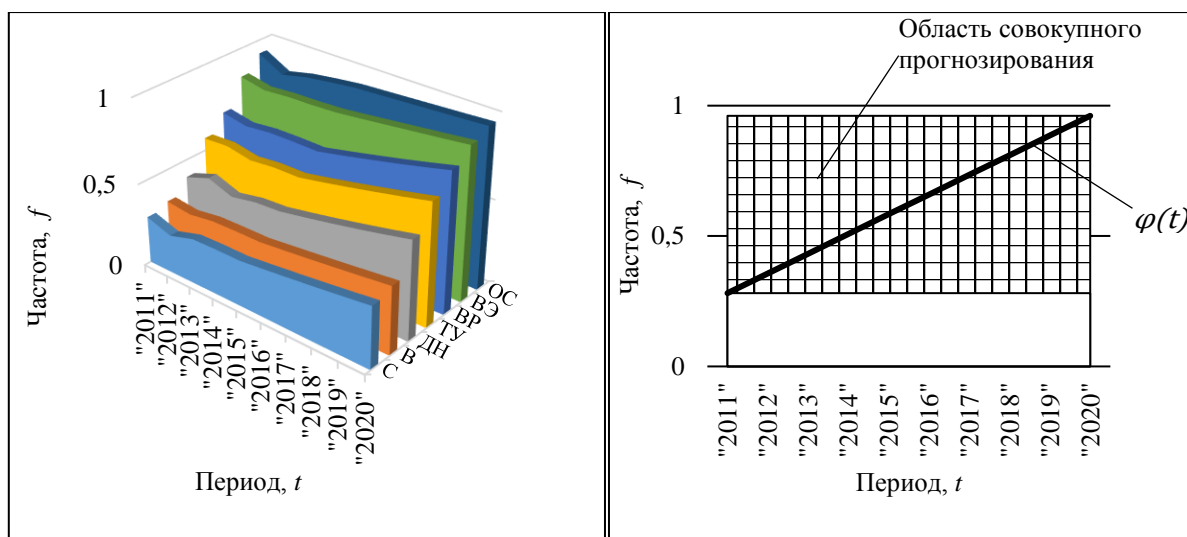


Рисунок 3 – Многокритериальное прогнозирование

Рисунок 4 – Динамика краткосрочного прогноза электротравматизма

**В третьей главе** применен аналитический метод математического моделирования и оптимизации системы безопасности электрических мобильных машин.

Моделирование осуществлено на основе математических соотношений, количественно фиксирующих условия подобия, определяющих состояние системы безопасности ЭММ.

Для устранения возникновения травмоопасных ситуаций в системе «Ч-ЭММ-ПО-ОС» рассмотрено состояние подсистем «безопасность–человек», «безопасность–ЭММ», «безопасность–проводимая операция», «безопасность–окружающая среда» с целью исследования и получения обобщенной аналоговой математической модели системы безопасности в следующем виде:

$$B = f(Ч, Э, О, S), \quad (7)$$

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

В результате исследования получена следующая функциональная зависимость факторов системы «Безопасность».

$$f(B, В, И, V, p_0 t, O_3, t^\circ, E) = 0, \quad (8)$$

В качестве основных факторов приняты к рассмотрению наиболее значимые: В – внимание, мышление; И – состояние изоляции; V – механические воздействия(вибрация);  $p_0$  – звуковые воздействия(шум);  $t$ –время работы;  $O_3$  – обеспечение безопасности;  $t^\circ$  – метеорологические условия(температура); E – освещенность рабочего места.

Проводя анализ системы «Безопасность» на основе использования  $\pi$  – теоремы, позволяющей произвести замену переменных (факторов), сократить их число с  $m$  – размерных величин до  $n-k$  – безразмерных величин, тем самым перейти к записи уравнения (7) в подобно-критериальной форме:

$$\pi_B = f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4), \quad (9)$$

На основе теории подобия установлены закономерности, характеризующие состояние системы безопасности и получены критерии подобия:  $\pi_1$  – операционной напряженности;  $\pi_2$  – функциональной надежности;  $\pi_3$  – энергетической нагрузки;  $\pi_4$  – метеорологических условий.

Полученные критерии подобия являются показателями системы безопасности ЭММ, которые необходимо использовать для принятия решений при управлении процессом повышения безопасности.

В современных условиях экономического развития на предприятиях каких-либо структур, а также на объектах электроэнергетики, отсутствует методология по оценке состояния электробезопасности, применяется

упрощенная формализация при решении задач по обеспечению безопасности труда, предупреждению несчастных случаев и возникновению электротравматизма людей. Полученные критерии подобия в системе «Безопасность» дают возможность систематизировать, обобщить и закономерно формализовать оценку состояния электробезопасности в виде математической модели, позволяющей расширить эмпирические исследования и перейти к качественной оценке.

На основании критериев подобия построена регрессионная модель электротравматизма при возникновении какой-либо травмоопасных ситуаций при эксплуатации ЭММ. В результате анализа установлено, что критерии подобия могут преобразовываться в критерии другой формы за счет математических операций. Используя это важное свойство критерии подобия в подсистемах представим так:

$$\pi_{\text{ч}}=B \cdot t; \pi_{\text{э}}=\frac{I \cdot V \cdot p_0}{E}; \pi_{\text{о}}=O_3 \text{ (условное значение); } \pi_{\text{с}}=t^\circ \quad (10)$$

Тогда исследуемая зависимость будет иметь вид:

$$\text{ЭТ} = f(\pi_{\text{ч}}, \pi_{\text{э}}, \pi_{\text{о}}, \pi_{\text{с}}) \quad (11)$$

В модели принята процедура идеализации, заключающаяся в выборе значимых факторов и получении критериев в допустимых пределах. Используя вычисленные значения критериев подобия по уравнениям (10) и (11), получим модель процесса возникновения опасных ситуаций, приводящих электротравматизму:

$$\text{ЭТ} = -53,25 - 0,21 \cdot \pi_{\text{ч}} + 0,02 \cdot \pi_{\text{э}} + 0,01 \cdot \pi_{\text{о}} + 1,19 \cdot \pi_{\text{с}} \quad (12)$$

На основании анализа регрессионной модели возникновения электротравматизма установлено, что наибольшее количество электротравм происходит при наличии опасных факторов подсистемы «ЭММ» - 60,9%, влияние факторов подсистемы «человек» на вероятность электротравматизма составляет 13,45%, подсистемы «проводимая операция» - 10,4%, подсистемы «окружающая среда» - 15,25%.

Решение задач оптимизации системы безопасности ЭММ базируется на построении технически эффективной и экономически целесообразной системы. В качестве показателя технической эффективности необходимо использовать вероятностные характеристики уровня электробезопасности. Экономическая эффективность оценивается предотвращенным ущербом от электротравматизма и затратами на создание эффективной системы безопасности. В качестве критерия оптимизации принимается вероятность возникновения и развития электроопасной ситуации.

Безопасность применения ЭММ рассматривается как состояние системы, при котором не возникает опасности нанесения ущерба здоровью человека. Электробезопасность представляет степень опасности или безопасности. Исходя из двойственного характера явления электротравматизма дана оценка уровня электробезопасности в детерминированном и вероятностном виде. При определении детерминированной оценки, на основании статистических данных по электротравматизму следует, что показатели демографической и энергетической частот при незначительных колебаниях по годам имеют тенденцию увеличения ( $k_d$  и  $k_E$  больше единицы), показатель летальности  $k_{Л}=35 \cdot 10^{-6}$  стабилен и остается достаточно высоким, что объясняется специфическими условиями эксплуатации ЭММ.

Вероятностная оценка уровня электробезопасности определена исходя из количественных показателей вероятности электропоражения  $P(\text{ЭП})$  или вероятности электробезопасности  $P(\text{ЭБ})$  в заданном интервале времени  $T$  и на множестве людей  $N$ . Это событие рассмотрено в виде двух несовместных событий:

$$\text{ЭП} = \text{ЭП}_1 + \text{ЭП}_2, \quad (13)$$

где  $\text{ЭП}_1$  – электропоражение в результате прикосновения к металлическим частям ЭММ, оказавшимся под напряжением при пробое изоляции;  $\text{ЭП}_2$  – электропоражение в результате прикосновения к токоведущим частям ЭММ.

Тогда полная вероятность электропоражения представляет собой сумму вероятностей событий:

$$P(\text{ЭП}) = P(\text{ЭП}_1) + P(\text{ЭП}_2) \\ \text{или } P(\text{ЭП}) = P(A_1) \cdot P(B_1) \cdot P(C_1) + P(B_2) \cdot P(C_2), \quad (14)$$

где  $P(A_1)$ ,  $P(B_1)$ ,  $P(C_1)$ ,  $P(B_2)$ ,  $P(C_2)$  – вероятности событий:  $A_1$  – пробоя изоляции;  $B_1$  – прикосновения человека к металлическим частям ЭММ;  $C_1$  – условное электропоражение человека, которое вызовет летальный исход;  $B_2$  – попадание человека под напряжение прикосновения;  $C_2$  – то же, что и  $C_1$ .

В результате расчета вероятность электропоражения составляет  $P(\text{ЭП}) = 13,32 \cdot 10^{-6}$ . Полученное значение  $P(\text{ЭП})$  превышает рекомендуемую норму уровня электробезопасности, равную  $1-3 \cdot 10^{-6}$  более чем в 4 раза.

Вопросы электробезопасности в современном аспекте при широком использовании ЭММ вызывают необходимость комплексного рассмотрения проблемы обеспечения требований безопасности. Принцип построения и функционирования системы обеспечения безопасности (СОБ) основаны на программно-целевом управлении при осуществлении взаимосвязанных мероприятий по обеспечению безопасности электроустановок. Управляющая функция СОБ рассматривается как составляющая часть общей системы. Установлено, что безопасность предполагает необходимость в управлении условиями ее формирования и построении матричной структуры управляющей

функции системного учета основных факторов в критериальной форме (рисунок 5).

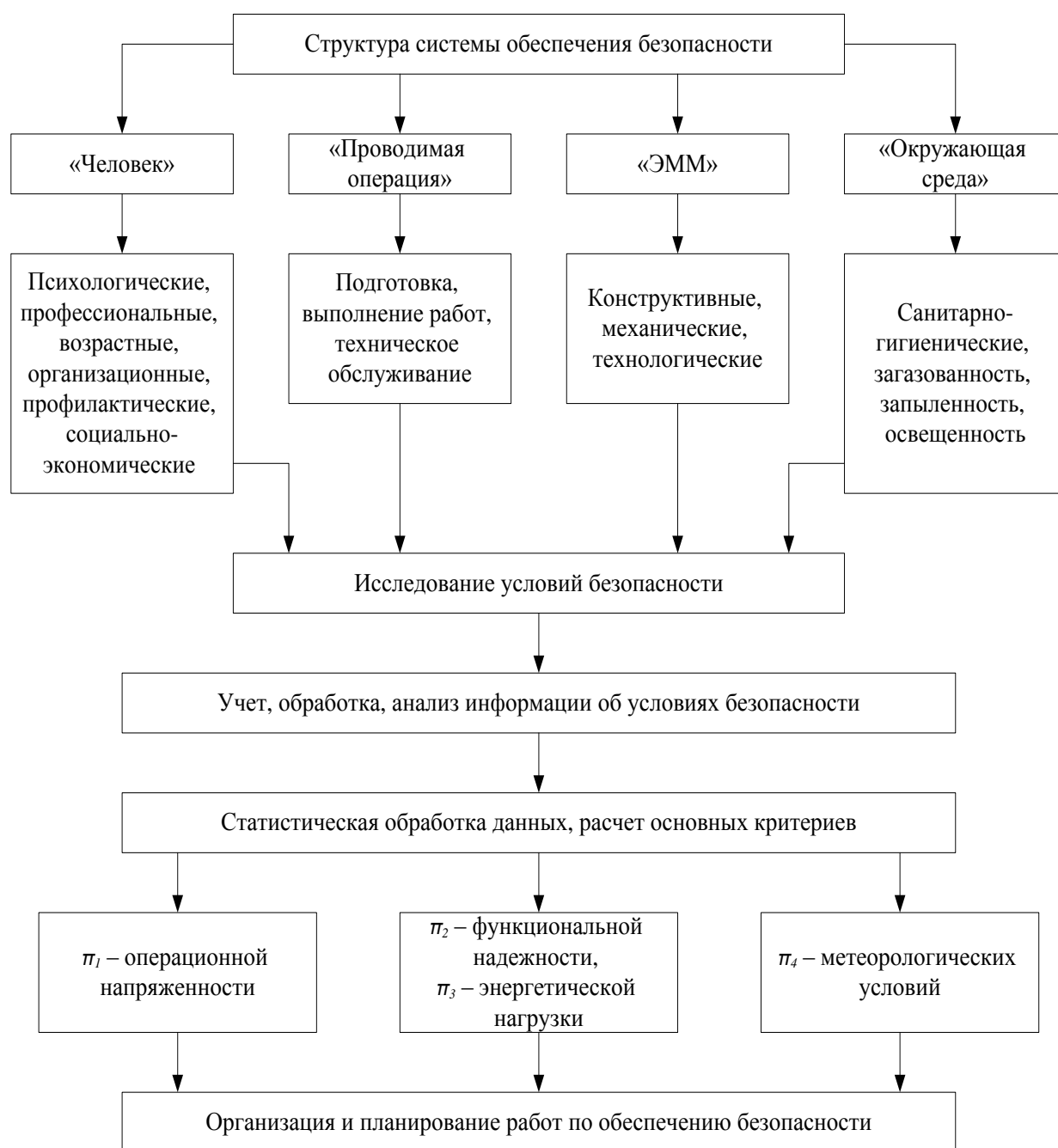


Рисунок 5 – Схема матричной структуры управленческой функции системы обеспечения безопасности

Управляющая функция СОБ построена на основе информации о совокупности мероприятий по улучшению функционирования управляемых факторов системы, а моделирование представляет взаимосвязь объекта управления и информационной части. Установлено, что безопасность на рабочем месте определяется входными параметрами(факторами), воздействующими на



безопасность электроустановки(ЭММ):  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , а выходной характеристикой служит некоторый уровень безопасности ЭММ:  $Y=f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ , (рисунок 6).

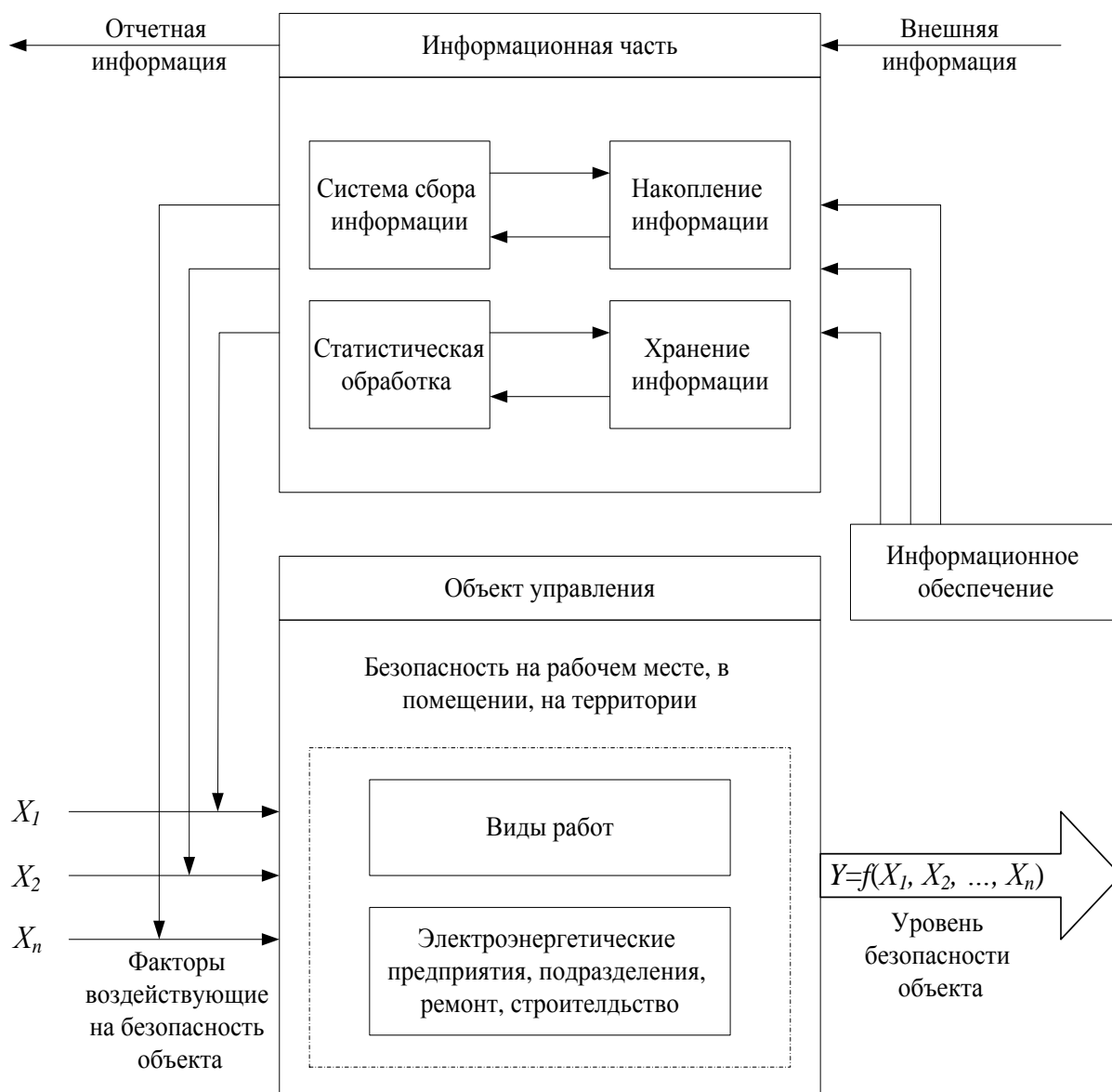


Рисунок 6 – Структурная схема информационной составляющей и объекта управления в системе обеспечения безопасности

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

**В четвертой главе** определены механизмы управления техногенной безопасностью ЭММ.

Рассмотренные показатели техногенной системы «Ч-ЭММ-ПО-ОС» отражают влияние важнейших факторов опасности, присущих конкретному виду производственной деятельности человека. Поэтому техногенная безопасность

ЭММ будет определяться состоянием электробезопасности с учетом комплекса взаимосвязанных факторов, оказывающих влияние на условия выполнения организационных, технических, социально-экономических мероприятий на основе программно-целевого управления и защитных средств, обеспечивающих безопасное взаимодействие человека с ЭММ в процессе ее эксплуатации.

В диссертации рассмотрен комплексный подход к созданию оптимальной технически эффективной и экономически целесообразной системы безопасности эксплуатации ЭММ. Данная система рассматривается как сложное понятие, являющееся средством представления объектов, т.е. ЭММ, и использование в целях их качественного исследования и совершенствования существующих способов обеспечения безопасности, имеющее решающее значение с точки зрения снижения возникновения электроопасных ситуаций.

В зависимости от топографических условий использования ЭММ применяется определенный вид электрозащиты, зависящий от системы заземления сети. В результате анализа эксплуатации ЭММ в различных системах электрических сетей, установлено, что система TN-C-S обеспечивает достаточно высокий уровень электробезопасности, являясь самой эффективной. В зависимости от класса защиты ЭММ (I, II, III) и условий их применения дан анализ возможности применения устройств защитного отключения (УЗО) для групповой и индивидуальной защит. Установлено, что эффективными, надежными и удобными в применении являются переносные УЗО однофазные и трехфазные: УЗО-вилки, УЗО-адаптеры, которые могут быть использованы для обеспечения безопасной эксплуатации ЭММ, являющихся нестационарными установками.

Решением задачи обеспечения электрической безопасности ЭММ явилась разработка технического средства защиты, способствующего созданию благоприятных условий труда человека-оператора.

При проведении исследований по применению электрозащиты разработано переносное УЗО-адаптер типа ДПА-Т (дифференциальный переносной адаптер-трехфазный), получен патент на полезную модель. (рисунок 7).

В результате лабораторных испытаний проводимых в соответствии с разработанной методикой установлено, что УЗО-адаптер соответствует техническим параметрам.

Важным этапом развития системы безопасности является формирование экономических средств, предусматривающих материальную ответственность за ущерб, причиненный здоровью людей, определение экономических показателей применения средств электрозащиты ЭММ.

Установлено, что социальные и экономические показатели тесно взаимосвязаны, поэтому социальный эффект от разработки и внедрения новой техники следует оценивать экономическими показателями.

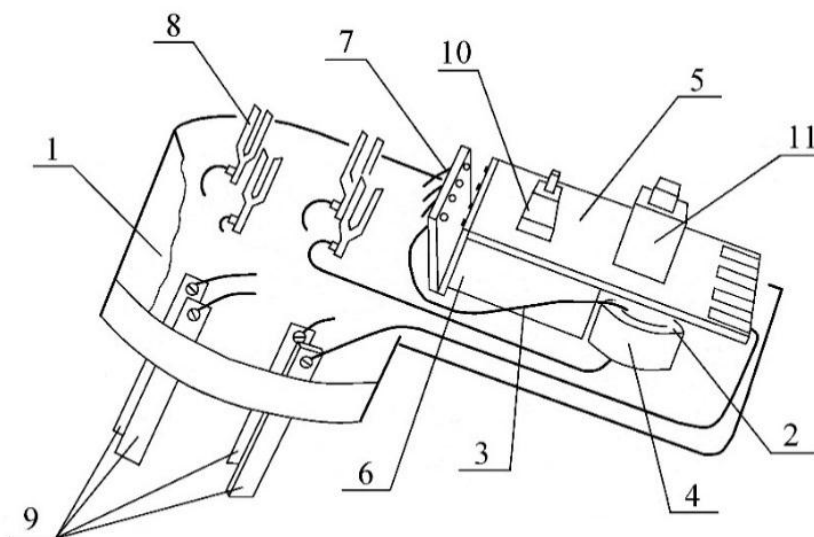


Рисунок 7 – Внешний вид УЗО-адаптера ДПА-Т:

1-корпус; 2-дифференциальный трансформатор тока; 3-первичная обмотка; 4-вторичная обмотка; 5-пусковое устройство; 6-соленоид; 7-силовая контактная группа; 8-розетка; 9-вилка; 10-«ТЕСТ»; 11-«ВКЛ»

Социальная эффективность внедрения УЗО-адаптера ДПА-Т оценена числом предотвращенных электропоражений  $n_{пред}$ :

$$n_{пред} = N[P(ЭП)_Б - P(ЭП)_Н], \quad (15)$$

где  $N$  – число единиц электроустановок (ЭММ);  $P(ЭП)_Б$ ,  $P(ЭП)_Н$  – вероятность электропоражения, приходящаяся на единицу ЭММ при базовых и новых средствах защиты.

Установлено, что при внедрении 15тыс.УЗО-адаптеров на объектах электроэнергетики Республики Бурятия число электротравм, предотвращенных в течении года составляет  $n_{пред}=1,3$ . При этом годовой экономический эффект, составляющий 592,4 тыс.руб., с учетом расчетного предотвращённого ущерба, равного 667,4 тыс.руб., для производственных предприятий электроэнергетики Республики Бурятия, более чем на порядок превышает затраты, связанные с внедрением УЗО-адаптеров на объекте.

### 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 ( $1-3 \cdot 10^{-6}$ ) 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 характеризуются количеством предотвращенных электротравм, равным 1,3, при этом экономическая эффективность составляет 592,4 тыс. руб., а предотвращенный ущерб – 667,4 тыс. руб.

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ**

### *В изданиях по перечню ВАК*

1. Еремина, Т.В. Анализ электротравматизма на объектах электроэнергетики [Текст] / Еремина Т.В., **Гармаев А.Л.**, Калинин А.Ф. // Вестник ВСГУТУ. – 2016. – №3. – С.28-31.

2. Калинин, А.Ф. Комплексная безопасность ручных электрических машин [Текст] / Калинин А.Ф., Еремина Т.В., **Гармаев А.Л.** // Безопасность труда в промышленности. – 2016. – №7 – С. 34-37.

3. Еремина, Т.В. Системный анализ техногенной безопасности электроустановок [Текст] / Еремина Т.В., **Гармаев А.Л.** // Вестник ВСГУТУ. – 2016. – №5. – С. 51-55.

4. Еремина, Т.В. Моделирование травмоопасных ситуаций при использовании электрических мобильных машин на объектах электроэнергетики [Текст] / Еремина Т.В., **Гармаев А.Л.**, Зонхоев Г.Б. // Вестник ВСГУТУ. – 2016. – №6. – С. 38-46.

*в других изданиях*

5. Еремина, Т.В. Совершенствование структуры безопасности электроустановок в сельскохозяйственном производстве [Текст] / Еремина Т.В., **Гармаев А.Л.**, Ижунцов О.В // Научная дискуссия: вопросы технических наук: материалы VIII международной заочной научно-практической конференции / – Москва: Изд. «Международный центр науки и образования» – 2013. – С.130-134.

6. Калинин, А.Ф. Оценка уровня электробезопасности мобильных машин [Текст] / Калинин А.Ф., Еремина Т.В., **Гармаев А.Л.** // II Международная заочная конференция «Проблемы техносферной безопасности» – Барнаул: Изд. АлтГТУ – 2016. – С.96-100.

7. Калинин, А.Ф. Математическое моделирование основных травмоопасных ситуаций при эксплуатации электроустановок [Текст] / Калинин А.Ф., Еремина Т.В., **Гармаев А.Л.** // II Международная заочная конференция «Проблемы техносферной безопасности» – Барнаул: Изд. АлтГТУ – 2016. – С.101-108.

8. Еремина, Т.В. Основные принципы анализа системы обеспечения безопасности электроустановок [Текст] / Еремина Т.В., **Гармаев А.Л.** // Электроэнергетика Байкальского региона: проблемы и перспективы: материалы Всероссийской научно-практической конференции – Улан-Удэ: Изд. БНЦ СО РАН – 2016. – С. 3-6.

9. Еремина, Т.В. Энергоэнтропийная концепция техногенной опасности электроустановки [Текст] / Еремина Т.В., Калинин А.Ф., **Гармаев А.Л.** О.К. Никольский // Электробезопасность. – 2016. – №1 –С. 32-36.

10. **Гармаев, А.Л.** Применение устройств защитного отключения при эксплуатации электрических мобильных машин [Текст] / **А.Л. Гармаев** // Республиканская научно-практическая конференция: Электроэнергетика, гидроэнергетика, надежность и безопасность. – Таджикский университет имени академика М.С. Осими. – Душанбе: «Промэкспо» – 2016 – С.146-149

11. Вероятностный анализ системы безопасности электроустановок [Текст]: учебное пособие для подготовки студентов специальностей «Электроснабжение», «Электроэнергетические системы и сети» / Еремина Т.В., **Гармаев А.Л.** // Улан-Удэ: Изд. ВСГУТУ, 2016. – 72 с.

*Патенты*

12. Патент 150476 Российская Федерация, МПК В25D11/04 Перфоратор ручной электрический ударного и ударно-вращательного действия [Текст] / Еремина Т.В., **Гармаев А.Л.**, Калинин А.Ф.; заявитель и патентообладатель

ФГБОУ ВПО «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления» заявл.08.07.2014; Опубл. 20.02.2015, Бюл. №5. – 3с.

13. Патент 168088 Российская Федерация, МПК Н01Н 83/14 Трехфазный выключатель дифференциального тока [Текст] / Еремина Т.В., **Гармаев А.Л.**, Калинин А.Ф.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления» заявл.11.04.2016; Опубл. 18.01.2017 Бюл. №2. – 2с.

Подписано в печать \_\_.\_\_.2017 г. Формат 60x84 1/16.  
Усл. печ. л. \_\_\_\_\_. Тираж 100 экз. Заказ \_\_\_\_\_.

---

Издательство ВСГУТУ  
670013, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40 в