

## МЕТОД ЭКСПЕРТНОЙ ОЦЕНКИ ИНТЕГРИРОВАННОГО РИСКА ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК 380/220 В

О.К. Никольский, Н.П. Воробьев, Н.И. Черкасова, А.Ф. Костюков

*Рассмотрен новый подход к оценке техногенным риском применительно к электроустановкам зданий и сооружений. Дано обоснование структуры аналитической сети для управления интегрированным риском  $R_{\Sigma}$  человеко-машинной системы. Сформирован перечень рискообразующих факторов, установлены их частоты и приведена лингвистическая оценка. Изложены принципы построения имитационной модели (Ч-ЭУ-С).*

*Ключевые слова: риск, электроустановка, человеко-машинная система, имитационная модель.*

Оценка и прогнозирование интегрированного риска электрохозяйства АПК представляет важную задачу стратегического управления техногенной безопасностью отрасли.

Целью данного исследования является разработка на основе применения нечеткой логики [1] модели ранжирования рискообразующих факторов (РФ) системы (Ч-ЭУ-С) для определения риска  $R_{\Sigma}$  и его сопоставление с нормативным значением для принятия соответствующих мер по снижению техногенной опасности.

Рассмотрим человеко-машинную систему на примере модели (человек-электроустановка - среда - «Ч-ЭУ-С»). Руководствуясь энергоэнтропийной концепцией техногенного риска [2], будем считать, что каждый компонент системы (Ч-ЭУ-С) обладает своей потенциальной опасностью. Так, функционирование электроустановки (ЭУ) связано с работой, потреблением, хранением и преобразованием энергии. В процессе эксплуатации ЭУ возможно неконтролируемое высвобождение накопленных потоков электрической энергии с последующим разрушительным ее распространением. Поэтому ЭУ является источником возникновения отказов и последующего развития аварий и несчастных случаев.

Человек (персонал, население) также является источником возникновения опасных иницирующих событий, проявляющихся в виде ошибок, невнимания, низкой квалификации, технической безграмотности и т.д.

Среда как компонент системы (Ч-ЭУ-С) также может представлять опасность вследствие превышения нагрузки рискообразующих факторов (например, параметров микроклимата сельскохозяйственных помещений)

сверхнормативных значений, возникновение нештатных ситуаций и т.д.

В самом общем виде функционирование системы (Ч-ЭУ-С) можно свести к нахождению точечных (или интервальных) значений зависимости между оценками рискообразующих факторов и интегрированного риска [3], т.е.

$$R_{\Sigma} = F(r_1, r_2, \dots, r_k), \quad (1)$$

где  $r_1, r_2, \dots, r_k$  – формализованные оценки рискообразующих факторов (частные риски).

В свою очередь

$$R_{\Sigma} = \sum_i^n p_i y_i, \quad (2)$$

если имеет место  $n$  опасных событий  $i$  в ЭУ с различными вероятностями  $p_i$  и соответствующим им ущербом  $y_i$ , в течение заданного времени  $T$ . Здесь интегрированный риск  $R_{\Sigma}$  электроустановки представляет собой мультипликативную характеристику, отражающую как вероятности возникновения техногенных опасностей поражающего, вредодействующего и деструктивного характера, так и их последствий, выраженных в денежном эквиваленте.

Остановимся на методах оценки составляющих выражения (2).

В общем случае вероятность опасности ЭУ можно представить в виде суммы вероятности возникновения ряда опасных несоместных событий:

$p_1$  – вероятность отказа электроустановки;

$p_2$  – вероятность возникновения электротравмы;

$p_3$  – вероятность пожара.

**МЕТОД ЭКСПЕРТНОЙ ОЦЕНКИ  
ИНТЕГРИРОВАННОГО РИСКА ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК 380/220 В**

Ограничимся рассмотрением трех основных событий; при необходимости перечень опасных событий (ОС) может быть увеличен (например, вероятности возникновения вредного воздействия электрического тока на организм животного, вызывающего электропатологию [4] и т.д.)

В свою очередь вероятность, например, электротравмы человека может быть представлена в виде произведения вероятностей следующих совместных событий:

$$P_{\text{эт}} = P_{\text{проб}} \cdot P_{\text{прик}} \cdot P_{\text{неот}} \cdot P_{\text{неис}}, \quad (3)$$

где  $P_{\text{проб}}$  - вероятность возникновения пробоя изоляции;  $P_{\text{прик}}$  - вероятность прикосновения к токопроводящей конструкции электроустановки, оказавшейся под опасным напряжением;  $P_{\text{неот}}$  - вероятность возникновения эффекта неотпускания, проявляющегося в невозможности самостоятельно разжать ладонь, охватывающую токоведущий контакт;  $P_{\text{неис}}$  - вероятность неисправности (или отсутствия электрической защиты).

Отметим, что аналогичные зависимости могут быть получены применительно к любому техногенному опасному событию электроустановки.

В настоящее время значительное число работ, посвященных вероятностному анализу электроустановок (Якобс А.И., Никольский О.К., Коструба С.И., Сошников А.А., Дробязко О.Н., Еремина Т.В. и др.). Однако при определении рэт (как, впрочем, вероятности возникновения аварии, пожара и т.д.) возникает основная проблема, связанная с отсутствием или недостаточностью исходных данных, их неточности и неопределенности. Поэтому при проведении расчетов, например, определение показателей пожарного риска, применяют среднестатистические данные по отрасли, вводят весьма серьезные допущения, что отражается на точности получаемых результатов. Кроме того, эти допущения нивелируют специфические особенности отдельных объектов и применяемые технологии. Такой подход не позволяет учитывать отдельные причины возникновения аварий электроустановок и соответственно рекомендовать адекватные меры безопасности. Поэтому действующие нормативные документы [5,6], наряду с применением количественных оценок опасности, рекомендуют иные подходы анализа сложных систем [2].

Использование вероятностных оценок в качестве критериев безопасности электроустановок может привести к подмене их количественными показателями надежности

(наработка на отказ). Это в свою очередь ведет к упрощению сложных человеко-машинных систем и их замене упрощенными бинарными системами [7]. Примером тому может служить функционирование устройства электрической защиты, в основе которого лежит принцип двоичного исчисления (защита сработала – 0, отказ – 1).

Для определения второго множителя выражения (2) представим риск в виде интеграла

$$R_{\Sigma} = \int_0^T F(Y) p(Y) dy, \quad (4)$$

где  $F(Y)$  – весовая функция потерь, с помощью которой опасные техногенные последствия различной природы приводятся к единой (например, стоимостной) оценке ущерба;

$p(Y)$  – плотность распределения случайной величины  $Y$  (ущерба).

Тогда интегрированный риск  $R_{\Sigma}$  электроустановки может рассматриваться как математическое ожидание причиняемых ущербов, т.е.

$$R_{\Sigma} = M[Y]. \quad (5)$$

Определения материальных ущербов от аварий, несчастных случаев на производстве (без летального исхода) и пожаров при налаженной системе сбора статистических данных не вызывает каких-либо методических трудностей. Что касается расчета материальных (гуманитарных) потерь от гибели людей, связанных с электротравмами, можно рекомендовать методику (8), в основе которой лежит оценка стоимости среднестатистической жизни человека [9]. При этом следует различать как называемый предотвращенный материальный ущерб от электротравматизма после внедрения необходимых мер (системы безопасности электроустановок) и остаточный (неустраненный) ущерб, который может иметь место и после внедрения СЭБ:

$$Y_{\text{пред.}} = \frac{\sum_{i=1}^T M(\Delta T)_{\text{пред } i} Y_i}{T}, \quad (6)$$

$$Y_{\text{ост.}} = \frac{\sum_{i=1}^T M(\Delta T)_{\text{ост } i} Y_i}{T}, \quad (7)$$

где  $M(\Delta T)_{\text{пред } i}$  и  $M(\Delta T)_{\text{ост } i}$  - математические ожидания соответственно числа

предотвращенных и остаточных электро-  
травм на множестве  $N$  электроустановок за  
время  $T$ ;

$u_j$  – средний ущерб от гибели одного ра-  
ботника в  $j$ -ом году рассматриваемого перио-  
да  $T$ .

Рассмотрим гипотетическую совокуп-  
ность рискообразующих факторов, опреде-  
ляющих уровень технического состояния  
электроустановок. В соответствии со структу-  
рой человеко-машинной системы выделим  
шесть кластеров (рис. 1).

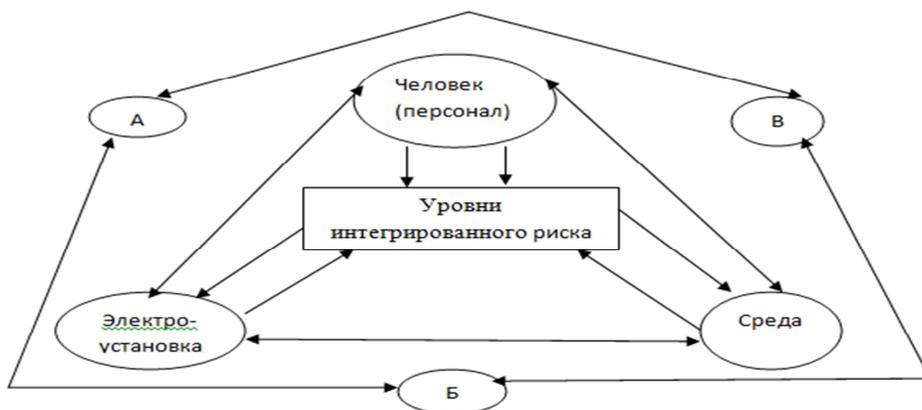


Рисунок 1 – Структурная схема аналитической сети для оценки интегрированного риска  
человеко-машинной системы (Ч-ЭЛ-С):  
А-законодательная нормативная база; Б-макроэкономические показатели; В - показатели  
инновационной сферы.

Будем считать, что кластеры рискообра-  
зующих факторов характеризуются пятью  
градациями уровня  $R_{\Sigma}$ : очень малый, малый,  
средний, высокий и очень высокий. Учитывая,  
что природа всей совокупности рискообра-  
зующих факторов различна, их значимость и  
качество могут быть оценены с помощью  
балльно-лингвистической шкалы. Для семан-  
тического описания рискообразующих факто-  
ров введем в шкалу оценок понятия: «низ-  
кий», «средний» и «высокий», которые могут  
изменяться в зависимости от степени опас-  
ности того или иного фактора.

В соответствии с рис. 1 ниже приведен  
перечень наиболее существенных рискооб-  
разующих факторов компонентов системы (Ч  
- ЭУ - С), которые будут положены в основу  
построения имитационной модели. Отметим,

что представленный перечень, не претендуя  
на обобщенность, является в известной мере  
условным. Вместе с тем перечень компонен-  
тов рассматриваемой системы для большин-  
ства электроустановок сельскохозяйственно-  
го производства является достаточно типич-  
ным. При выполнении процедуры настройки  
имитационной модели (ИМ) представляется  
возможным учитывать отдельные особен-  
ности объектов, вводя соответствующие кор-  
рективы количественных характеристик ИМ в  
соответствии с имеющимися статистическими  
данными.

Для оценки интегрированного риска  $R_{\Sigma}$   
введем пятибалльную лингвистическую шка-  
лу (табл. 1) с интервальными значениями со-  
гласно нормативно - технической документа-  
ции [5,10,11].

Таблица 1- Балльно-лингвистическая шкала оценки риска

Вид $R_{\Sigma}$	Характеристика риска	Балл [ 0-10]
Очень малый	Пренебрежительный - [1·(10-7-10-9)]	0
Малый	Приемлемый (нормативный) - (1·10-6)	0,25
Средний	Допустимый - [1·(10-4-10-5)]	0,5
Высокий	Неприемлемый - [1·(10-2-10-3)]	0,75
Очень высокий	Катастрофический - [<1·10-2]	1,0

Рассмотрим систему электроснабжения  
сельских населенных пунктов (сельских по-  
селений). При этом ограничимся воздушными  
и кабельными линиям напряжения 0,4 кВ с

заземленной нейтралью, питающих произ-  
водственные и общественные здания и со-  
оружения, частные дома и др. непосред-  
ственно от трансформаторных подстанций.

## МЕТОД ЭКСПЕРТНОЙ ОЦЕНКИ ИНТЕГРИРОВАННОГО РИСКА ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК 380/220 В

Сама система электроснабжения (СЭС) представляет электропроводку, предназначенную для транспортировки и поставки электроэнергии непосредственно приемникам, главный распределительный электрощит - распределительное устройство, электрические щитки, содержащие коммутационную и защитную аппаратуру, сети освещения.

В рамках рис. 2 рассмотрим следующие понятия:

Авария - разрушение (частичное или полное) элементов и узлов электроустановки, приводящее к перерывам электроснабжения потребителей. Авария ЭУ может также сопровождаться несчастным случаем и (или) пожаром.

Несчастный случай, связанный с электроустановкой – электротравма (поражение электрическим током). Будем различать электротравматизм:

- производственный – (электротехнический или неэлектротехнический персонал, который принимает непосредственные участия в обслуживании ЭУ);

- непроизводственный или бытовой электротравматизм имеет отношение к населению (индивидууму), которое практически обслуживает всю бытовую «электротехнику», в т.ч. информационно-технологическое оборудование.

В соответствии с [8] последствия электротравмы человека могут быть различными (электрический удар; частичная потеря трудоспособности - легкая степень; инвалидизация – средняя степень, летальный исход).

Инцидент - неполадки, частичные разрушения узлов (конструкций) ЭУ, приводящие к отклонению от нормальных режимов электроснабжения потребителей, нарушение требований ПУЭ, ПТЭиБ и других нормативных документов. Для формирования процедуры принятия решения по оценке и управлению интегрированного риска электроустановки с учетом неопределенности исходных данных целесообразно использовать метод экспертных оценок и теорию нечетких множеств для построения логико-информационной модели, содержащей три основных этапа: выявления рискообразующих факторов и их лингвистическую оценку, возникновения опасной техногенной ситуации и определения ущерба.

В табл.2 представлено рассмотрение рискообразующих факторов компонентов системы (Ч – ЭУ – С) и внешней среды. В качестве числовой меры вероятности риска, выбраны значения, измеряющиеся от 0 до 1, с учетом весов, характеризующих рейтинг опасности РФ, расположенного по мере его

убывания. Числовая мера ущерба может быть выражена интервальным значением, измеряющимся от 0 до бесконечности.

Вероятности РФ оцениваются экспертно. Функцией принадлежности [12] риска задается нечеткое подмножество «рискообразующий фактор». Для формирования системы нечеткого вывода с целью установления степени опасности рискообразующих факторов введем следующее правило:

$$\mu[«I», «K», «L», «M», «S»], \quad (8)$$

где  $\mu$  – функция принадлежности.

Логические операции (8) являются нечеткими, а входящие в правило утверждения, в соответствии с табл.1, имеют следующий смысл:

«I» - рискообразующий фактор имеет очень высокое значение (риск катастрофический);

«K» - фактор имеет высокое значение (риск неприемлемый);

«L» - фактор имеет среднее значение (риск допустимый);

«M» - фактор имеет низкое значение (риск приемлемый);

«S» - фактор имеет очень низкое значение (риск пренебрежительный).

Табл.2 содержит обоснование способа задания функции принадлежности лингвистических переменных с использованием трехуровневых шкал, учитывающих:

- надежность «человеческого фактора»;

- уязвимость электроустановки (свойство противостояния рискообразующим факторам);

- негативное влияние факторов среды;

- качество законодательных нормативных актов;

- качество макроэкономических показателей;

- качество инновационной среды.

Реализация приведенных принципов заложена в рассматриваемой имитационной модели. В частности, описанные рискообразующие факторы могут рассматриваться в ИМ как возмущения, которыми в зависимости от компонентов системы являются ошибки, казусы, негативные воздействия среды. Причем, каждому рискообразующему фактору может быть присвоен соответствующий показатель частного риска  $r_i$  (1). Эти возмущения в соответствии с логикой ИМ выстраиваются в причинную цепь предпосылок, которая может прервана, например, сработала электрическая защита, персонал устранил ошибку, внештатная нагрузка среды нивелировалась.

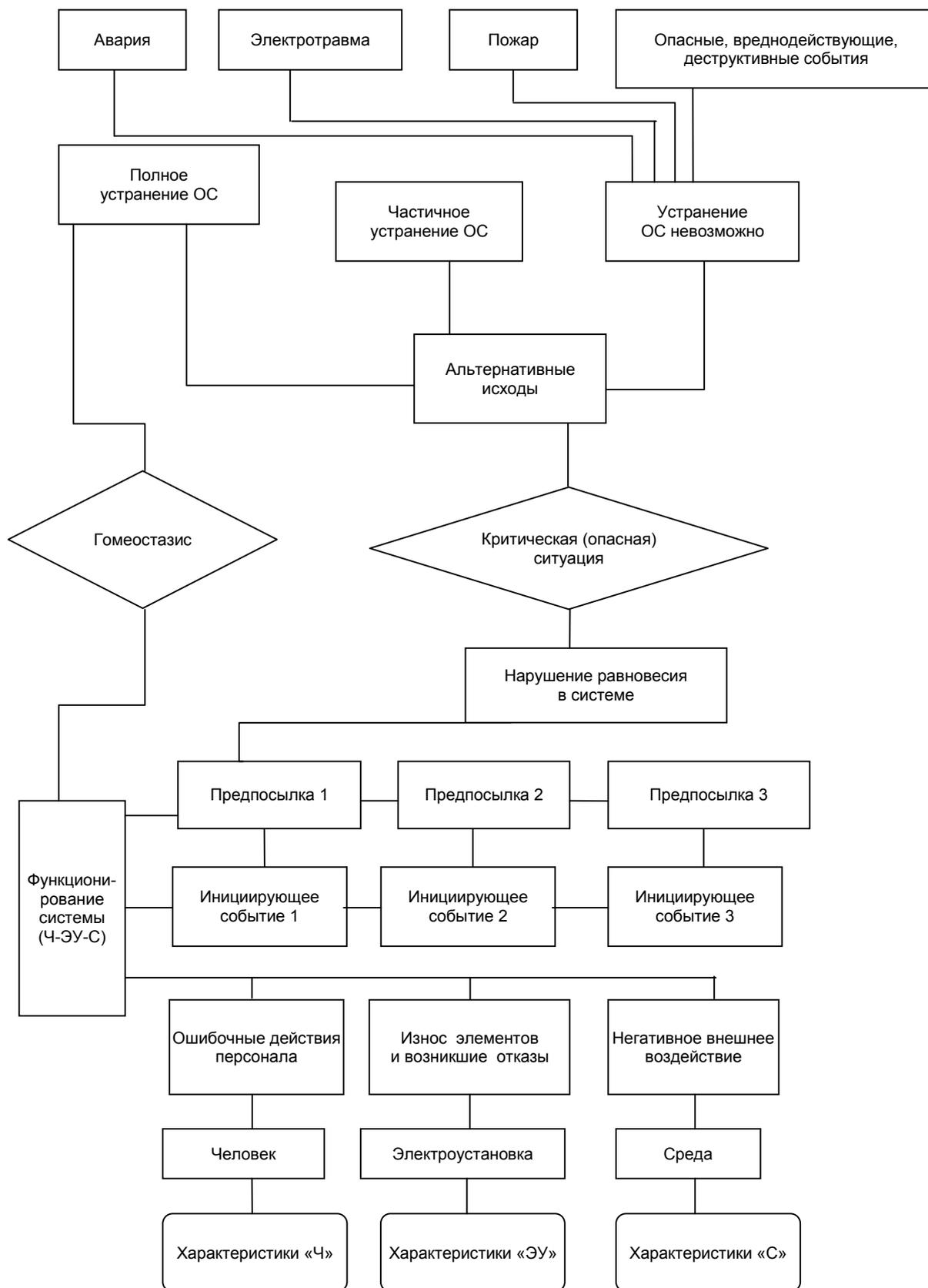


Рисунок 2 – Структура имитационной модели функционирования системы (Ч-ЭУ-С)

МЕТОД ЭКСПЕРТНОЙ ОЦЕНКИ  
ИНТЕГРИРОВАННОГО РИСКА ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК 380/220 В

*Таблица 2 - Рискообразующие факторы системы (Ч-ЭУ-С)*

Компонент системы	Код	Наименование рискообразующего фактора	Частота (вес) в совокупности причин возникновения рисков	Лингвистическая оценка
Человек (персонал, населения) (Ч)	Ч-01	Производственная дисциплина	РЧ-01	низкая
				средняя
				высокая
	Ч-02	Контроль за процессом производства	РЧ-02	плохой
				средний
				хороший
	Ч-03	Соблюдение безопасных приемов труда	РЧ-03	плохое
				удовлетворительное
				хорошее
	Ч-04	Уровень профессионализма	РЧ-04	низкий
				средний
				высокий
Ч-05	Самообладание в экстремальных ситуациях	РЧ-05	неудовлетворительное	
			удовлетворительное	
			хорошее	
Ч-06	Ритмичность производства	РЧ-06	низкая	
			средняя	
			высокая	
Ч-07	Обученность действиям в нестандартных ситуациях	РЧ-07	неудовлетворительная	
			удовлетворительная	
			хорошая	
Ч-08	Навыки выполнения работы	РЧ-08	плохие	
			средние	
			хорошие	
Ч-09	Выполнение технологического процесса	РЧ-09	плохое	
			удовлетворительное	
			хорошее	
Ч-10	Физическое состояние	РЧ-10	плохое	
			удовлетворительное	
			хорошее	
Ч-11	Психологические показатели	РЧ-11	плохие	
			удовлетворительные	
			хорошие	
Ч-12	Профессиональная мотивация	РЧ-12	слабая	
			удовлетворительная	
			высокая	
Электроустановка (ЭУ)	Э-01	Возможность отказа (неисправности) мер электрической защиты	РЭ-01	низкая
				средняя
				высокая
	Э-02	Длительность воздействия опасных и вреднодействующих факторов	РЭ-02	малая
				средняя
				большая
	Э-03	Степень физического износа электропроводки и электрооборудования	РЭ-03	низкая
средняя				
высокая				
Э-04	Наличие (укомплектованность) мер безопасности электроустановки	РЭ-04	неудовлетворительное	
			удовлетворительное	
			хорошее	
Э-05	Степень морального износа узлов электроустановки	РЭ-05	низкая	
			средняя	
			высокая	
Э-06	Уровень воздействия в системе источников опасных и вреднодействующих факторов	РЭ-06	низкий	
			средний	
			высокий	
Э-07	Надежность (безотказность) узлов и конструкций электроустановки	РЭ-07	низкая	
			средняя	
			высокая	

Продолжение таблицы 2

Компонент системы	Код	Наименование рискообразующего фактора	Частота (вес) в совокупности причин возникновения рисков	Лингвистическая оценка
Среда (С)	С-01	Качество текущего ремонта электротехнологического оборудования и электропроводки	РС-01	плохое
				удовлетворительное
				хорошее
	С-02	Возможность техногенных опасных воздействий рискообразующих факторов	РС-02	низкая
				средняя
				высокая
	С-03	Периодичность диагностики и технического состояния электроустановок	РС-03	редкая
				эпизодическая
				достаточная
	С-04	Уровень комфортности рабочей среды (по физическо-химическим параметрам)	РС-04	плохой
				средний
				хороший
	С-05	Возможность техногенных вредных воздействий рискообразующих факторов	РС-05	низкая
				средняя
				высокая
Законодательная и нормативная база (А)	Степень соответствия качества федеральных нормативных документов современным требованиям техногенной безопасности электроустановок человеко-машинных систем			
	А-01	Нормативно-технологические документы (ПУЭ, ПТЭиБ, СНиПы, НПБ)	РА-01	неудовлетворительная
				удовлетворительная
				хорошая
	А-02	Федеральное законодательство (в т.ч. технические регламенты)	РА-02	неудовлетворительная
				удовлетворительная
				хорошая
	А-03	ГОСТы. Р	РА-03	неудовлетворительная
				удовлетворительная
хорошая				
Макроэкономические показатели (Б)	Б-01	Доступность инновационных ресурсов	РБ-01	низкая
				удовлетворительная
				высокая
	Б-02	Структурные изменения экономической политики в области охраны труда и безопасности производства (налоговая политика, ставки банковского кредита и т.д.)	РБ-02	отрицательные
				удовлетворительные
				положительные
	Б-03	Система планирования и контроля в области проектирования, монтажа и эксплуатации мер комплексной безопасности электроустановок	РБ-03	плохая
				удовлетворительная
				хорошая
Инновационные показатели (В)	В-01	Степень готовности выполненных разработок к внедрению	РВ-01	низкая
				удовлетворительная
				хорошая
	В-02	Объем текущих исследований и разработок (в т.ч. финансирование)	РВ-02	неудовлетворительный
				удовлетворительный
				хороший
	В-03	Наличие и качество концепций НИОКР	РВ-03	отсутствует
				низкий
				удовлетворительный

## МЕТОД ЭКСПЕРТНОЙ ОЦЕНКИ ИНТЕГРИРОВАННОГО РИСКА ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК 380/220 В

Балльные и лингвистические оценки каждого рискообразующего фактора выбираются на основании анализа исходных данных, соотнося их с требованиями соответствующих нормативных документов. Для оценки их соответствия в табл. 1 предложена пятиуровневая балльная шкала интегрированного риска с их численным значением. Это позволяет полученные результаты расчета  $R_{\Sigma}$  (их оценки) применительно к реальным объектам сравнивать с введенной шкалой риска, что является основанием принятия решения, касающаяся постановки задачи оптимизации системы безопасности электроустановок.

Для формализации исходных данных (статистика аварий и электротравматизм) по рискообразующим факторам использованы качественные оценки, опирающиеся на трехуровневую лингвистическую шкалу: например, к фактору «Производственная дисциплина» - «низкая», «средняя», «высокая», а к фактору «Уровень комфортности рабочей среды» - «плохой», «средний», «хороший». Всего в ИМ введено 33 рискообразующих факторов, что позволяет унифицировать качественные и количественные исходные данные для системы (Ч-ЭУ-С).

С помощью сформированной базы знаний экспертной системы представляется возможным провести корректировку исходной модели (1), что позволит настроить и применить ИМ для различных объектов, содержащих в общем случае различные электроустановки, обладающие имманентными свойствами.

Изложенная концепция экспертной системы может быть реализована в виде программного комплекса на числовом примере, что дает возможность взвешенно подойти к оценке мер техногенной безопасности производственного объекта.

При проведении расчетов рисков на реальных объектах численные значения в столбце 4 могут быть получены согласно статистики и анализа данных по авариям электроустановок, несчастных случаев от электропоражения и возникновения пожаров.

### Выводы

1. Определение интегрированного риска электроустановки связано с оценкой частот (вероятностей) возникновения опасных техногенных событий в виде негативных воздействий электрического тока на человека и окружающую среду. Вероятность опасного события может быть оценена либо апостериорно, с помощью статистических данных, ли-

бо априорно, позволяющего определить долю в общей совокупности причин возникновения опасности по каждому рискообразующему фактору.

2. В основе изложенного метода экспертной оценки  $R_{\Sigma}$  лежит ранжирование рисков, учитывающих отказы ЭУ, ошибки персонала (индивидуума) и неблагоприятные воздействия внешней среды, что позволяет прогнозировать возникновение техногенных опасностей и принять соответствующие меры по оптимизации интегрированного риска системы (Ч – ЭУ – С).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шеннон Р. Имитационное моделирование системы – искусство и наука. - М.: Мир, 1978, - 418 с.
2. Белов П.Г. Теоретические основы системной инженерии безопасности-М.:ГНТП «Безопасность»МИБСТС.-1996.-424 с.
3. Никольский О.К., Воробьев Н.П. и др. Техническая диагностика и остаточный ресурс электроустановок :монография .Алт.гос.техн.ун-т им. И.И. Ползунова.-Барнаул, изд-во АлтГТУ, 2013.-207с.
4. Никольский О.К. Системы обеспечения электробезопасности в сельском хозяйстве.- Барнаул, Алт. кн. изд-во, 1977.-192 с.
5. РД 08-120-96. Методические рекомендации по проведению анализа риска опасных производственных объектов.
6. ГОСТ Р 51901.1-2002. Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем.
7. Бендукидзе А.Д. Система исчисления. Квант, 1975.-№ 8.-С.59-61.
8. Еремина Т.В. Вероятностный анализ безопасности сельских электроустановок: монография.-Улан-Удэ, Изд-во ВСГТУ,2010.-200 с.
9. Легасов В.А., Демин В.Ф. и др. Дисконтирование и компромисс между поколениями. Проблема анализа риска,2005, Т.2.-№ 2.-С.114-131.
10. Федеральный закон Российской Федерации о пожарной безопасности № 123-ФЗ (Технический регламент «О требованиях пожарной безопасности»).
11. ГОСТ Р МЭК 60695-1-1-2003. Руководство по оценке пожарной опасности электротехнической продукции. Основные положения.

**Черкасова Н.И.** - Рубцовский индустриальный институт АлтГТУ им. И.И. Ползунова, зав. кафедрой «Электроэнергетика», к.т.н., доцент,

тел. (38557)5-98-75,

E-mail: 4ercas@bk.ru

**Костюков А.Ф.** - АлтГТУ им. И.И. Ползунова, докторант кафедры «Электрификация производства и быта», к.т.н.,

E-mail: elnis@inbox.ru,

тел. (3852) 36-71-29