

## ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К АНАЛИЗУ ИНТЕГРИРОВАННОГО РИСКА ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ СИСТЕМ

А.Ф. Костюков, Н.И. Черкасова

*Приведена классификация методов анализа техногенного риска применительно к человеко-машинной системе (человек-электроустановка-среда). Обоснован комплексный показатель (интегрированный риск  $R_{\Sigma}$ ), учитывающий возможность совершения опасного события и его последствий. Рассмотрена процедура оценки, прогнозирования и управления интегрированным риском. Сформулирована общая задача оптимизации мер безопасности электроустановок.*

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

Анализ имеющихся статистических данных показывает, что в России наметилась устойчивая тенденция роста техногенных аварий на объектах энергетики, электротравматизма и пожаров. Материальный ущерб составляет десятки миллиардов рублей в год. Полный ущерб по официальным данным достигает 3 – 5 % от ВВП страны.

Зачастую, при анализе причин сложившейся негативной техногенной обстановки в России, основной принято считать критический износ основных фондов объектов энергетики, что, в принципе, не вызывает сомнений. Вместе с тем, скрытой остается проблема научно-методического обеспечения опасных производственных объектов (в том числе систем электроснабжения).

Под оценкой риска опасности электроустановки (ЭУ) условимся понимать количественное измерение показателя риска и его сравнение с приемлемым (нормативным) значением. Оценка риска предполагает определение как вероятности (возможности реализации) опасного события, так и его последствий (ущерба, потерь). Целью оценки риска ЭУ следует считать принятие решений, направленных на его снижение.

В соответствии с [1] ниже приведена классификация методов анализа интегрированного риска электроустановки (табл. 1). Отметим, что эти методы не являются универсальными, каждый из них имеет свои недостатки и область применения. Так, использование детерминистического метода, например, расчета надежности конструкции электрической машины, ограничивается достаточно простыми объектами без учета человеческого фактора. Метод не позволяет учесть разнообразие возникновения и развития нештатных режимов работы электроу-

новки и построить достаточно адекватные математические модели.

Отметим, что детерминистический метод является затратным, требует дорогостоящей диагностической аппаратуры, привлечения квалифицированного персонала. Для формирования репрезентативной статистической выборки необходимо либо увеличения интервала наблюдения ( $T \ll \Delta t$ ), либо расширение совокупности исследуемых объектов, подверженных интегрированному риску (электропоражению людей, отказам, пожарам электроустановок и т.д.). В этом случае вероятность опасного события за интервал  $\Delta t$  оценивается через их частоту (интенсивность) с помощью пуассоновского потока случайных событий:

$$\lambda = \frac{n}{T}, \quad (1)$$

где  $n$  – число событий за время наблюдения  $T$ .

Статистический метод количественной оценки риска ЭУ, как уже отмечалось выше, требует значительного объема данных, которых необходимо иметь. Для снижения статистической погрешности, и обеспечения требуемой точности оценки риска ЭУ создание временных рядов может привести к формированию выборок с неоднородными данными (существует случайный разброс по годам, меняются условия опасности и т.д.). В этом случае по имеющейся статистике за  $T$  лет с помощью интерполяции производится оценка математического ожидания числа (частоты)  $n(\Delta t)$  негативных событий. Тогда прогнозирование можно выполнить путем экстраполяции функции (2)

$$Q(T) = f(n_1, \dots, n_T) \quad (2)$$

ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К АНАЛИЗУ ИНТЕГРИРОВАННОГО РИСКА  
ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ СИСТЕМ

*Таблица 1 - Классификация методов анализа рисков*

Название метода	Характеристика	Рекомендуемый математический аппарат
Детерминистический	Метод предполагает использование (описание) известных физических процессов, протекающих в электроустановках и применение классических методов анализа и синтеза электрических цепей и электромагнитного поля. Предусматривается рассмотрение последовательности этапов развития техногенной опасности, начиная от исходного события старения и износа до установившегося конечного состояния – отказа ЭУ.	Математический анализ (дифференциальное уравнение в частных производных). Теория надежности. Теория прогноза. Метод реализуется на базе фундаментальных законов физики, химии и механики.
Статистический	Метод основан на использовании достаточно больших объемов исходных данных при минимальном числе допущений. Статистическая информация может быть получена путем проведения модельных и стендовых испытаний, экспериментальных и натурных исследований. Выборка наблюдений должна соотноситься с оцениваемой априорной вероятностью.	Временные ряды. Корреляционный и регрессионный анализ. Пуассоновские распределения.
Вероятностный	Метод основан на оценке частот событий или их вероятностей (в случае редких событий, например, электротравма с летальным исходом, а также распределений возникших ущербов и потерь). При этом используются математические модели, описывающие цепочки инициирующих событий, приводящих к техногенным угрозам.	Теория вероятностей. Теория статистических решений. Теория катастроф.
Экспертный	В основе метода лежит оценка риска ЭУ при отсутствии статистической модели. Метод может быть реализован либо с помощью визуализации риска и представления его в виде качественных лингвистических переменных, либо с привлечением высококвалифицированных специалистов (экспертов).	Имитационное моделирование. Аппарат нечеткой логики. Теория экспертных систем. Теория принятия решений в условиях неопределенности.

когда точность оценки прогноза временных рядов можно провести с помощью дисперсии или среднеквадратического отклонения,

$$Q(T+t) = \varphi(n_1, \dots, n_T). \quad (3)$$

Вероятностный метод предполагает как оценку вероятности возникновения опасного события, так и расчет ущербов от них. При оценке вероятности возможных ущербов, как правило, используется нормальное распределение (рис. 1). В соответствии с кривой Гаусса события с небольшими ущербами встречаются значительно чаще, чем события с большими потерями. Согласно кривой 1 опасные события с большими ущербами происходят крайне редко. Так, вероятность электротравмы с летальным исходом оценивается как  $10^{-5} - 10^{-6}$ . Согласно [2] существуют крайне редкие события с достаточно большими ущербами, которые описываются статистическими распределения с «тяжелыми хвостами» (кривая 2). Для таких степенных распределений вероятность отклонения от средних значений существенно больше, чем при Гауссовском распределении. Частота

негативных событий с тяжелыми последствиями, находящихся в «хвосте» распределения мала. Такие события (например, электропоражение человека с летальным исходом) для конкретной электроустановки могут возникать чрезмерно редко или вообще не происходить. Однако отсутствие электропоражения даже в течение достаточно длительного времени теоретически не исключает появления его в обозримом будущем. Будем считать, что распределение несчастных случаев от электроустановок по ущербу соответствует кривой 2. Тогда риск электротравматизма в общем виде можно представить, как

$$R = \int_0^{\infty} r(y) dy. \quad (4)$$

Пусть  $Y$  отражает материальный ущерб при попадании человека в цепь электрического тока в случае прямого или косвенного прикосновения токоведущего элемента электроустановки. В соответствии с [3] возможны три степени тяжести (исхода) электротравмы:

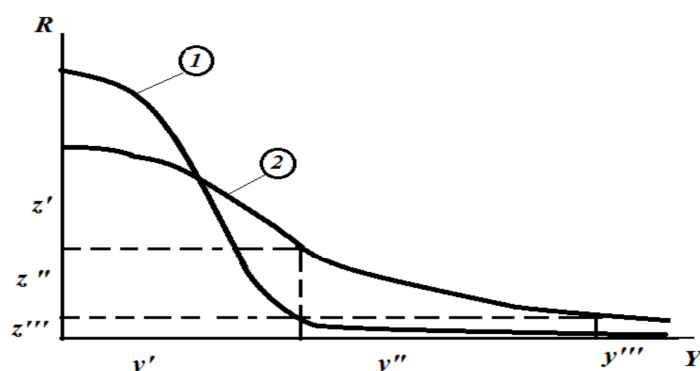


Рисунок 1 – Теоретические распределения рисков электротравмы по степени последствий (тяжесть исхода)

- легкая степень, вызванная временной потерей трудоспособности (ЛС);
- средняя степень - полная потеря трудоспособности (СС);
- тяжелая степень – летальный исход (ТС).

Будем характеризовать каждую степень тяжести соответствующими параметрами:

ЛС- (  $r'$  ,  $y'$  ); СС- (  $r''$  ,  $y''$  ); ТС- (  $r'''$  ,  $y'''$  )

Рассматривая риск как вероятность опасного события (электротравма), примем пределы его изменения от 0 до 1,0. Тогда количество электротравм в зависимости от степени их тяжести оценивается: ЛС=0,56; СС=0,28; ТС=0,16 [3]. Отметим, что такой подход реализуется по апостериорным оценкам (при наличии статистических данных).

При прогнозировании риска тяжести электротравмы может быть использовано выражение

$$R_i = \int_0^{\infty} r_i(y_i) dy, \quad (i\text{-ый исход электро-}$$

травмы) (5)

В основе вероятностного метода анализа риска ЭУ должны лежать математические модели (построение деревьев событий и исходов), устанавливающие закономерности перерастания инициирующих случайных событий в головное событие (авария, электротравма, пожар). При этом определяются частоты (вероятности) отмеченных редких событий и оцениваются частные показатели с помощью анализа источников потенциальной опасности, статистики их реализации в форме инициирующих событий, предполагаемых сценариев развития и их последствий, т.е. ущербов (потерь). Вероятностный метод используется при отсутствии исходных данных и других количественных оценок; метод достаточно трудоемок и имеет невысокую точность. Тем не менее, этот метод в настоящее

время находит наиболее широкое применение при анализе опасных техногенных объектов, включая электроустановки зданий и сооружений.

Рассмотрим процедуру анализа и управления интегрированным риском ЭУ (рис. 2). Целью анализа риска является разработка алгоритма управления его уровнем путем мониторинга информации по установлению техногенных опасностей и их количественных оценок, включая расчет ущербов. Анализ риска обеспечивает методическую основу для прогнозирования и разработку мероприятий по снижению его уровня. Действия, осуществляемые для выполнения поставленной цели - достижения нормативного значения  $R_{\Sigma}(t)$ , можно рассматривать как управление, или менеджмент риска [4].

Первый этап. Рассматривается структурно-морфологическая модель системы (Ч-ЭУ-С) и проводится ее семантическое описание. При исследовании системы необходимо вначале провести декомпозицию, т.е. мысленно расчленив ее на составные части (компоненты) для описания их свойств и установления взаимосвязей. Затем совокупность подсистем рассматривается как органическое единство сложного объекта, обладающего качественно новыми системными свойствами. На этом этапе также необходимо ввести параметры, количественно отражающие свойства компонентов исследуемой модели. Далее обосновываются показатели, характеризующие техническую и экономическую эффективность системы в рамках теории рисков. Формулируются цели анализа интегрированного риска. Определяются и классифицируются источники потенциальных опасностей. Дается описание условий окружающей среды, подразделяя ее на внутреннюю (т.е. область непосредственного функционирования электроустановки с учетом человеческого фактора) и внешнюю, включая

## ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К АНАЛИЗУ ИНТЕГРИРОВАННОГО РИСКА ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ СИСТЕМ

правовые, организационные и экономические факторы, опосредованно влияющие на эффективность функционирования сельских производственных объектов. Классифицируются факторы, характеризующие среду, различая при этом детерминистические, вероятностные и неопределенные. Формулируется общая задача оптимизации и ее математическая постановка.

Второй этап связан с задачами идентификации техногенных опасностей и негативной оценки их последствий. Все виды опасностей модели (Ч-ЭУ-С) должны быть определены и систематизированы. Отметим, что основным видом угроз в электроустановках является электрическая (электромагнитная), которая проявляется во многих аварийных, предаварийных и рабочих режимах в виде отказов, электропоражений, пожаров и др.

Третий этап предполагает проведение анализа интегрированного риска, конечной целью которого является прогнозирование ущерба (потерь), который может быть причинен отдельному хозяйствующему субъекту от различного вида техногенных угроз: человеку, окружающей среде, страховым компаниям и в целом обществу. Ущерб рассматривается как результат логически связанных причинных факторов, приводящих к негативным последствиям. При оценке риска может быть использован системно-целевой подход [5], базирующийся на теории систем. Сущность этого подхода состоит в исследовании модели (Ч-ЭУ-С) с помощью системного анализа и синтеза.

Четвертый этап - моделирование системы (Ч-ЭУ-С), включает учет существенных факторов, определяющих возникновение и последствия опасностей, составление смысловых моделей и их формализация с помощью графических диаграмм причинно-следственных связей (дереьев событий и исходов). Семантическая модель типа дерева включает одно головное событие, которое соединяется с помощью заданных конкретных условий с исходными и промежуточными предпосылками, обусловившими появление этого события. В частном случае головным событием дерева в зависимости от поставленной цели может быть отказ или несчастный случай, а его «ветви» - набор соответствующих предпосылок, образующих причинные цепи. «Листьями» дерева события служат исходные события - предпосылки (например, авария или ошибка персонала), дальнейшая детализация которых нецелесообразна.

Пятый этап - частотный анализ, применяемый для оценки вероятности идентифицированных техногенных опасностей (ТО) системы (Ч-ЭУ-С). Частотный анализ ТО опирается на использование основных положений теории вероятностей и математической статистики. Для оценки частот ТО используются известные подходы: статистический, экспертный и математический. В основе первого лежит сбор, обработка и анализ ретроспективных данных об опасных техногенных событиях (отказы, аварии, электротравмы и т.д.). Метод экспертных оценок, с помощью привлечения специалистов, позволяет провести сравнительное качественное или количественное ранжирование каждой идентифицированной опасности. Математический метод может быть использован из-за недостатка данных, касающихся человеческого фактора. Основой учета и оценки неопределенностей является теория нечетких множеств. Методы управления риском на нечетких моделях позволяют удобно и достаточно объективно производить ранжировку и оценку факторов по определенным критериям. При этом возможны лингвистическая, интервальная и точечная оценка с использованием функции принадлежности [6].

Шестой этап - анализ последствий (исходов), направлен на оценку ущербов (потерь), вызванных:

- простоем технологического оборудования и недоотпуском продукции из-за перерывов электроснабжения потребителей;
- компенсационными издержками вследствие возникших аварий и отказов электроустановок;
- электротравматизмом людей с летальным или тяжелым исходом (потерей трудоспособности);
- потерей молокоотдачи у коров и привесов у животных на откорме, вызванных электропатологией;
- потерей электроэнергии в сетях из-за несимметрии нагрузок и наличия высших гармоник напряжения и тока.

Представляется целесообразным оценку общего ущерба проводить в денежном эквиваленте, используя при этом понятие «стоимости среднестатистической жизни человека» (ССЖЧ). Это понятие является достаточно условным, т.к. жизнь человека не является рыночным товаром, однако материальные потери, связанные с гибелью людей, объективно существуют, поэтому эти потери могут быть монетарно оценены [7]. Для оценки величины гуманитарного ущерба может быть принята величина, обоснованная в деклара-

ции Российского научного общества анализа риска [8], согласно которого ущерб, связанный с гибелью человека в прогнозируемой техногенной аварии составляет 30÷40 млн.руб.

Седьмой этап - процедура вычисления риска. При этом следует различать виды рисков:

1) индивидуальный, которому подвергается человек, получивший электротравму (оценивается вероятностью попадания человека под напряжение или прогнозируемой частотой смертности или инвалидности);

2) коллективный, определяемый ожидаемым числом смертельно травмированных в результате возникновения ТО за определенный период времени;

3) социальный, характеризующийся отношением числа погибших от электротравм к определенному множеству людей.

Отметим, что все перечисленные риски могут быть определены статистическим либо вероятностным (с помощью математического моделирования) методом.

Последующие этапы, связанные с сопоставлением полученных расчетных значений интегрированного риска электроустановок с нормативным (приемлемым), установленным соответствующим законодательством, наглядно иллюстрируются на рис.2.

Заключительным этапом является, так называемая, обработка риска, описываемая процессом выбора и выполнения мероприятий для изменения риска (уменьшение значения или предотвращение).

Цель менеджмента риска состоит в мониторинге, идентификации и осуществлении обоснованных рентабельных мероприятий, направленных на получение приемлемого риска. Для определения, является ли риск приемлемым, рассматривается его значение, оставшееся после выполнения процедуры обработки риска. Если риск не является приемлемым, то рассматриваются действия, направленные на снижение или предотвращение риска. Мониторинг риска должен быть непрерывным на всех этапах, включая проектирование, эксплуатацию и реконструкцию ЭУ. Результатом выполнения процедуры анализа и менеджмента интегрированного риска может служить матрица риска (рис. 3), с помощью которой становится возможным выбор оптимальной стратегии, направленной либо на минимизацию значения  $R_{\Sigma}$  риска при заданных ресурсных и финансовых ограничениях, либо на минимизацию затрат и издержек при выборе приемлемого (нормативного) значения интегрированного риска ЭУ.

Экспертный метод оценки риска ЭУ может быть использован при анализе сложных человеко-машинных систем в условиях неопределенности, когда не только отсутствуют статистические данные по редким опасным событиям с тяжелыми хвостами, но и математические модели из-за чрезвычайной сложности их формализации. Традиционно метод предполагает использование опыта высококвалифицированных специалистов в рассматриваемой предметной области (экспертов). Существенным недостатком этого метода является принципиальная невозможность систематического накопления знаний экспертов для решения конкретных задач в области техногенной безопасности ЭУ, а также отсутствия инструментальных средств, позволяющих извлекать новые знания из накапливаемых данных в ходе решения задач.

Математический аппарат теории нечетких множеств позволяет уйти от проблемы статистической неоднородности. Недостаток многих современных подходов к оценке техногенных рисков кроется на использовании только количественных показателей, которые не позволяют учитывать так называемые «мягкие факторы» [9]. Эти факторы проявляются на ранних стадиях изменения качества функционирования человеко-машинных систем при формировании иницирующих событий и не поддаются количественному описанию.

Методы, основанные на нечетких множествах, позволяют практически использовать информацию, имеющую неполный, неточный и неколичественный характер. Эти методы отличаются большим многообразием, основанном на различных подходах к оценкам риска (лингвистические, точечные, интервальные, нечеткие). Недостатком нечеткой логики остается отсутствие обоснованных алгоритмов для построения функций принадлежности.

Интеллектуальный подход к принятию решений осуществляется на основе использования знаний, заложенных в экспертных системах. Экспертные системы в сущности моделируют поведение эксперта при принятии решения в конкретной предметной области. При этом базы данных и знаний и соответствующие им модели представляются в форме и выводе понятных лицу, принимающему решение. База знаний представляет собой сведения, факты и правила, заранее структурированные и интерпретированные. Характерным для экспертных систем является применение аппарата нечетких множеств.

ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К АНАЛИЗУ ИНТЕГРИРОВАННОГО РИСКА  
ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ СИСТЕМ

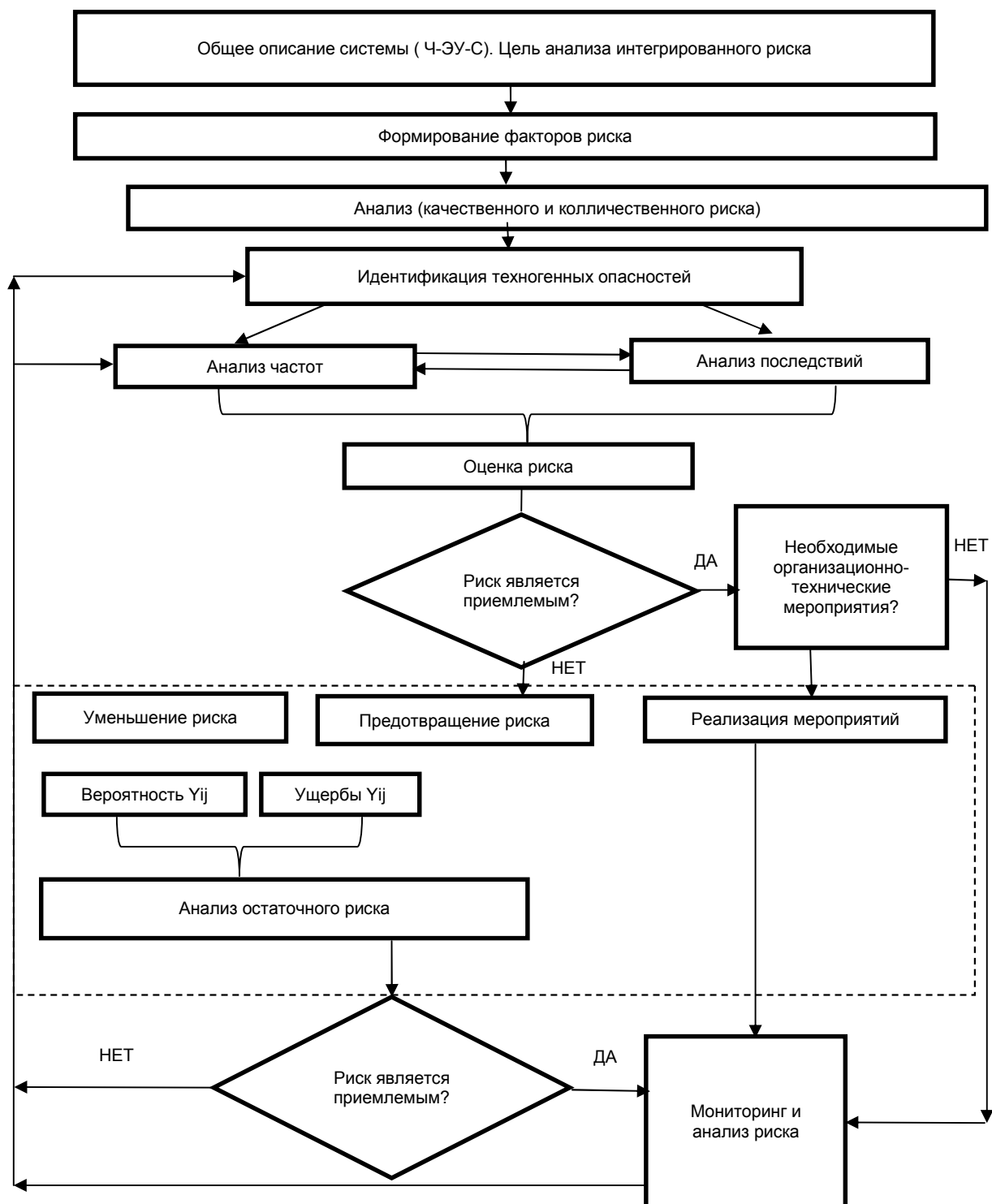


Рисунок 2 – Алгоритм анализа интегрированного риска

Последствия (ущербы) ТО(Y <sub>i</sub> )	Высокие	R <sub>31</sub>	R <sub>32</sub>	R <sub>33</sub>
	Средние	R <sub>21</sub>	R <sub>22</sub>	R <sub>23</sub>
	Низкие	R <sub>11</sub>	R <sub>12</sub>	R <sub>13</sub>
		Низкая	Средняя	Высокая
		Вероятность появления ТО (P <sub>i</sub> )		

Рисунок 3- Матрица риска

## Выводы

1. В настоящее время широко используются детерминистические и статистические методы анализа техногенной безопасности. Первый подход опирается на классическую теорию надежности технических средств. В основе второго подхода лежат апостериорные методы исследования, в ряде случаев нереализуемые из-за недостатка исходных данных. Преобладание апостериорных методов над априорными при анализе сложных человеко-машинных систем приводят к принятию серьезных допущений, не учёту человеческого фактора, что неизбежно ведет к ошибкам при принятии решений.

2. Существующие трактовки понятия техногенного риска как количественной меры опасности представляемые либо в виде вероятности появления негативного события, либо оценки последствий этого события (ущерба) не отражают в полной мере многопараметрические свойства различных конструкций электроустановок, неоднородность и неоднозначность описания причинно-следственной цепи происшествий. Такая цепь в общем случае представляет последовательность событий-предпосылок: отказ, вызванный ошибками персонала, факторы внешней среды, высвобождение неконтролируемого потока энергии, отсутствие (или неисправность) предусмотренных средств электрической защиты, возникновение опасных событий с тяжелыми последствиями.

3. Целесообразно термины электрической, пожарной, электромагнитной безопасности (или опасности) заменить одним понятием – интегрированным риском электро-

установки. В этом случае учитываются все основные опасные события: электротравма, пожар, электромагнитное излучение и их последствия (ущербы, потери). Такой комплексный подход к пониманию сущности интегрированного риска соответствует содержанию ГОСТ Р 22.0.05 – 94. «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Термины и определения» и позволяет избежать неоднозначности в оценке причин и анализа возникновения техногенной опасности.

Комплексный показатель – интегрированный риск электроустановки  $R_{\Sigma}$ , сформированный на основе анализа методов техногенной безопасности, выраженный через возможность (вероятность) опасных событий и их последствий, может объективно претендовать на замену им всего многообразия частных показателей, применяемых в настоящее время.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов – М.: НТИ «Промышленная безопасность» - 2001.
2. Вентцель Е.С. Исследование операций – М.: Советское радио. 1972.- 551 с.
3. Еремина Т.В. Вероятностный анализ безопасности сельских электроустановок. Монография. – Улан-Удэ, изд-во ВСГТУ, 2010. – 200 с.
4. Чернова Г.В. Управления рисками / Г.В. Чернова, А.А. Кудрявцев – М.: Проспект, 2003. - 153 с.
5. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1978. - 257 с.
6. Кофман А. Введение в теорию нечетных множеств.- М.: Радио и связь, 1982.- 432 с.
7. Легасов В., Демин В., Шевелов Я. Нужно ли знать меру в обеспечении безопасности? - Энергия, 1984.- № 8.-С.9-14.
8. ISO/IEC Guide 98:1995/guide to the expression of uncertainty in measurement.
9. Борисов А.Н., Крумберг О.А., Федоров Н.П. Принятие решений на основе нечетных моделей. Рига-Зинатне,1990.

**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

**Черкасова Н.И.** - Рубцовский индустриальный институт АлтГТУ им. И.И. Ползунова, заведующий кафедрой «Электроэнергетика», к.т.н., доцент, тел. (38557)5-98-75, E-mail: 4ercas@bk.ru