УДК537.8:631.1

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СИСТЕМЫ УЧЕТА, ОЦЕНКИ, АНАЛИЗА, ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО РИСКА ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК**

**Черкасова Н.И.**

*Россия, г. Рубцовск, РИИ АлтГТУ*

**Никольский О.К.**

*Россия, г. Барнаул, АлтГТУ*

**Семичевский П.И.**

*Россия, г. Москва, МГАУ*

Определено понятие техногенного интегрального риска при взаимодействии системы: человек – электроустановка - среда, включающее социальный, материальный и экономический ущербы. На основе структуры интегрального риска, рассмотрены способы анализа риска, в сочетании трех компонентов: вероятности возникновения опасности, её длительности и последствий. В системе управления рисками предложен единый методологический подход к оценке рисков. Рассмотрена структура интегрального ущерба, предложена методика прогнозирования интегрального риска

*Понятие интегрального риска и его структура.*Техногенный риск обычно отождествляется с ожиданием потерь и характеризуется как ущерб, понесенный из-за возникновения опасной ситуации. Для понимания природы риска существенным является изучение связей его с ущербом. Совершенно очевидно, что чем выше риск тем больше потери. С другой стороны, для снижения риска нужны определенные затраты, которые не должны быть неограниченными. Поэтому должен существовать некий оптимум значения риска, определяемый по критерию «затраты – выгоды» [1]. В этом смысле риск можно отнести к категории экономической.

Существующая характеристика риска как опасности не раскрывает всей его сущности, посколькуриск характеризуется не только опасностью, но и случайностью. Случайное событие – это неизвестное событие, неопределенность которого может быть исследована методами теории вероятностей. Проведенный анализ существующих определений риска [2] позволяет считать, что техногенный риск представляет собой вероятность наступления опасного случайного события, результатом которого является ущерб, наносимый человеку, имуществу и среде его обитания. При этом следует различать, когда вероятность наступления опасного техногенного события может быть рассчитана, и ситуацию неопределенности, когда вероятность этого события не может быть определена. Необходимость разграничения понятий неопределенности и риска вызвано тем, что при выполнении профилактических мероприятий, направленных на повышение безопасности, в ситуации вероятного риска следует руководствоваться принципом приемлемого количественного значения уровня, а в ситуации неопределенности – качественными его оценками.

Введем понятие интегральный риск электроустановки, под которым условимся понимать показатель потенциальной техногенной опасности, учитывающий социальный, материальный и экономический ущерб, выраженный в едином денежном эквиваленте. Тогда математическая модель интегрального риска может быть представлена как

, (1)

где ,  и  - риски социального, материального и экологического ущерба (,и ).

Интегральный риск должен учитывать все виды опасности электроустановки, включая электрическую, пожарную, электромагнитную и экологическую, обусловленные неконтролируемым высвобождением электрической энергии, ее распространением и негативным воздействием на людей и животных, материальные и природные ресурсы, электромагнитную обстановку (рис. 1).



Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема интегрального риска

Исходя из энергоэнтропийной концепции электротравматизма и пожаров [3] будем рассматривать интегральный риск  как результат взаимодействия системы «человек – электроустановка – среда».Здесь компонент человек (Ч) является потенциальной жертвой, компонент электроустановка (ЭУ) – источник техногенной опасности. Вмести с тем все три компонента являются источниками причин возникновения опасных техногенных ситуаций (ОТС) и их исходов, т.е. отказов и аварий электроустановок, ошибок и неправильных действий человека (в частном случае, обслуживающего персонала) и негативных (неконтролируемых) воздействий среды.

В этом случае интегрированный риск условно можно изобразить в виде заштрихованного сегмента, образованного при пересечении трех окружностей (рис. 2). Возникающее неравновесие системы (Ч – ЭУ – С), вызванное накопленной энергией, приводит к техногенному риску вследствие скачкообразного или постепенного прироста энтропии в результате аварии электроустановки или по причине старения и износа электрооборудования.

*Оценка и анализ риска.* Рассмотрим риск как сочетания двух компонентов – вероятности опасного события и его последствия. Выделим следующие идеализированные ситуации объекта (или субъекта) безопасности:

1. Вероятность возникновения опасного события близка к нулю (бесконечно мала), но ущерб от возможного события конечен. Тогда риск равен нулю.

2. Вероятность возникновения опасности существует, но ущерб субъекту, связанный с этим событием бесконечно мал. В этой ситуации опасность также отсутствует, т.е. риск равен нулю.

3. Вероятность события и ущерб от него равны нулю. Ситуация характеризуется как достоверное отсутствие опасности (абсолютная безопасность).



Рисунок 2 – Иллюстрация техногенного риска электроустановки

Во всех других случаях, когда вероятность и ущерб принимают значения отличные от нуля, ситуация оценивается как опасная, характеризуемая определенным значением риска.

Обеспечение необходимой статистической информацией является важным условием проведения анализа риска и его количественной оценки. Однако из-за недостатка исходных данных единственно возможным являются методы качественного анализа, основанные на использовании экспертных оценок и ранжировании степени риска.

В таблице 1 приведена шкала базовых оценок компонентов риска в электроустановках, выраженных в лингвистическом и численном виде.

Таблица 1

Наименование компонента и его лингвистические оценки

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Вероятность события | Длительность ОТС | Последствие ОТС (ущерб) | Численное значение | Балл  |
| Допустимо, но маловероятно | Очень быстро | Очень низкий | 0,1 | 5 |
| Неопределенно возможно | Быстро  | Низкий | 0,3 | 4 |
| Практически возможно | Умеренно длительно | Средний | 0,5 | 3 |
| Вполне возможно | Длительно  | Высокий | 0,7 | 2 |
| Наиболее возможно | Очень длительно | Очень высокий | 0,9 | 1 |

Здесь опасное событие и его составляющие разбиты по величине вероятности и тяжести последствий риска на пять рангов с недопустимо высоким, высоким, промежуточным, низким и ничтожным уровнем риска. Соответствующим рангам присвоены числовые и бальные значения.

Рассмотренный подход качественного анализа позволяет высокий уровень риска (баллы 1 и 2) считать неприемлемыми, требующим выведения объекта из эксплуатации и его остановки; промежуточный уровень риска (балл 3) требует выполнения организационно-технических мероприятий по уменьшению его уровня; низкий ранг (балл 4) квалифицировать как приемлемый, а ничтожным риском (балл 5) – пренебречь.

В электроустановках в качестве фактора опасности выступает электрический ток, который, воздействуя на человека, может привести к негативным последствиям (болезнь, инвалидность, летальный исход). При определенных условиях электрический ток является причиной возникновения пожара. Опасные последствия неконтролируемого появления тока в электрических цепях зависят, как известно, не только от его величины, но и длительности воздействия на объект (субъект) защиты, т.е. в конечном случае от величины выделившейся электроэнергии. Учитывая последнее, интегральный риск будем рассматривать (рис. 3) как вектор связи трех компонентов (вероятности возникновения опасности, длительности существования опасности и последствия опасности). Каждый конкретный компонент отражает одну из сторон потенциальной опасности объекта, совокупность которых может быть выражена как качественно, так и количественно.



Рисунок 3 – Графическая интерпретация исходного и остаточного интегрального риска

Как следует из рисунка значение исходного риска Rисх в координатах (0,7; 0,6; 0,2) относится к промежуточному уровню и требует необходимого его снижения до величины Rост (0,4; 0,2; 0,2), оцениваемой как приемлемый риск.Изложенное является иллюстрацией эмпирического подхода к оценке риска и не является примером расчета риска реальной электроустановки.

Одним из основных элементов в системе управления рисками является выбор научно обоснованного метода их оценки. Можно выделить различные группы методов оценки рисков (статистические, экспертные, модельные и др.), для каждой из которых разработаны разнообразные приемы и методики их применения [4]. Имеются компьютерные системы в области моделирования экологических загрязнений, рисков аварий и катастроф. Вместе с тем, необходим единый методологический подход, предполагающий комплексный учет возможных способов оценки техногенных рисков в электроустановках. Такая методология для получения комплексной оценки риска в настоящее время отсутствует. В значительной степени это объясняется различными трактовками понятия риска: одна – определяет риск как вероятность появления опасного события; вторая – трактует риск как ущерб, который может нанести возможное опасное событие; в третьей–риск рассматривается как двухпараметрическая величина, включающая в себя вероятность наступления опасного случайного события и величину, связанных с ним потерь. Эти параметры описываются как числовыми оценками (математическим ожиданием, дисперсией), так и законами распределения вероятностей. Двухпараметрический подход может применяться для оценки и формирования адекватных прогнозов при известных статистических данных, например, относящихся к количеству электротравм или пожаров и величинам их ущербов. В этом случае, используя статистический материал, строятся гистограммы, функции распределения и плотности распределения случайной величины ущерба. Тогда результат обработки статистических данных можно представить в виде случайной величины

, (2)

где *τ* – некоторое элементарное событие в соответствующем вероятностном пространстве, *N* – заданный статистический ряд.

Величина ожидаемого ущерба за конкретный срок от электротравматизма и пожаров определяется как

. (3)

При отсутствии статистических данных (в условиях неопределенности) для оценки рисков могут быть использованы экспертный метод и лингвистические оценки.

Алгоритм экспертного метода достаточно широко применяется [5] и состоит в том, что результаты экспертных оценок рассматриваются в виде случайных величин. Допустим, что каждый эксперт задает значение возможного ущерба с указанием вероятности реализации этого значения. С учетом *N* экспертов в конечном итоге получаем распределение дискретной случайной величины. Таким образом, в результате проведения этой процедуры имеем совокупность случайных величин, значения которых отражают точку зрения группы экспертов относительно прогноза рассматриваемой величины

, (4)

где *Sj* – информация, которую получил эксперт с соответствующим номером *j*.

Метод экспертных оценок при отсутствии достоверных статистических данных удобно сочетается с использованием так называемых базовых лингвистических оценок, которые позволяют в трехмерном векторном пространстве получить интегральную оценку техногенного риска электроустановок (см.рис.3). Использование в данной работе трехпараметрического метода анализа позволяет учитывать специфику электроустановки, в которой фактор времени воздействия электрического тока на человека или объект, является решающим при электротравме или возникновении пожара.

В общем случае анализ рисков, в основе которого лежит последовательная декомпозиция системы (Ч – ЭУ – С) на отдельные структурно-функциональные компоненты, позволяет идентифицировать и учесть все основные рискообразующие факторы, систематизируя при этом «отказы электроустановки», «ошибки и неправильные действия персонала» и «нерасчетное воздействие среды». Для выявления техногенных предпосылок с помощью модели «дерево событий» следует учитывать не только критические отказы (аварии электроустановки), которые, как уже отмечалось, приводят к неконтролируемому высвобождению энергии, но и повреждения из-за старения и дефектов изоляции и токоведущих элементов электрооборудования.

*Оценка ущерба ОТС.*Приоценки интегрального риска электроустановки необходимо определение не только вероятности появления ОТС, но и учет всех видов потерь и издержек и оценка полного интегрального ущерба. Отметим, что компоненту издержек от опасных событий следует рассматривать как неизбежную согласно законов термодинамики [3].

В соответствии с принятой классификацией [6] полный ущерб складывается из прямого и косвенного, каждый из которых, в свою очередь, содержит социальную, материальную и экологическую составляющую ущерба. Считаем, что полный ущерб в достаточной степени отражает все издержки, являющиеся компонентом интегрального риска. Поэтому полный ущерб будем называть интегральным ущербом.

Рассмотрим структуру интегрального ущерба в рамках системы (Ч – ЭУ – С), представленной на рис 4.

Условимся считать, что прямой (непосредственный) ущерб обусловлен утратой работоспособности электроустановки (выход из строя, т.е. отказ). Косвенный ущерб, являясь следствием прямого, в общем случае определяется разрушением связей между электроустановкой и другими (сторонними) объектами, использующими электроэнергию для технологических нужд.

Рассмотрим составляющие интегрального ущерба.

Социальный ущерб (YC). Этот вид ущерба проявляется в виде гибели людей, вызванной электрическим поражением или при пожаре из-за повреждения электроустановки, а также потери трудоспособности, обеспечения услугами здравоохранения, социальными льготами и другими компенсационными затратами. Согласно статистическим данным [7] доля аварий и пожаров в зданиях и на коммунальных системах жизнеобеспечения составляет почти 50 % всех ЧС, произошедших на локальных объектах. Отмеченный социальный ущерб не ограничивается только немедленным воздействием рискообразующего фактора. Необходимо также учитывать и отдаленные последствия негативного проявления электромагнитного поля электроустановки, выражающиеся ухудшением здоровья населения из-за экологического загрязнения среды обитания.

Материальный ущерб (YМ).Объектами материального ущерба, вызванного отказами (авариями) электроустановки, являются производственные, общественные и жилые здания, готовая продукция или недоотпуск ее, убытки, вызванные перерывами электроснабжения, снижения качества электроэнергии, подаваемой потребителю, а также потери, вызванные снижением продуктивности животных (молокоотдачи коров и привесов животных, находящихся на откорме) [1].

Последствия этого вида ущерба могут привести к снижению эффективности объектов энергетики, вызванной нарушением режимов работы электроустановок, преждевременному выбытию основных производственных фондов и мощностей.

Экологический ущерб (YЭ). Этот вид ущерба обусловлен возникновением пожаров от электроустановок и опасными электромагнитными излучениями и проявляется в виде ухудшения характеристик природных ресурсов, животного и растительного мира и т.д.

Несмотря на имеющуюся условность и нечеткость отдельных компонентов структуры интегрального ущерба, приведенного на рис. 4, классификация позволяет изучить многогранность проявления техногенного ущерба и его зависимость от большого числа перечисленных выше факторов. Все это свидетельствует о необходимости одновременного учета как вероятности возникновения аварий и несчастных случаев в электроустановках, так и издержек и потерь, являющихся следствием проявления опасных событий.

Рисунок 4 – Структура интегрального ущерба от электроустановок

*Прогнозирование интегрального ущерба* и его составляющих связано с оценкой в денежном эквиваленте гибели и травмирования людей, уничтожение флоры и фауны, учета издержек от опасных электромагнитных излучений и т.д. Перечисленное относится к классу сложных системных задач решение которых требует не только применения классических методов математического моделирования, в частности, статистического, основанного на использовании случайных распределений параметров и учете непрерывно изменяющихся факторов. Здесь необходимо также отдавать предпочтение экспертным оценкам, в основе которых лежат эмпирические знания, полученные в процессе изучения и наблюдения без объяснения причин и механизмов наблюдаемых явлений. Представляется перспективным как уже отмечалось, использование семантического (смыслового) моделирования, базирующегося на некоторой совокупности исходных положений (гипотез), и нечеткой логике [8]. Отметим, что в основе применения тех или иных методов моделирования должен лежать учет того ущерба, который обусловлен случайным неконтролируемым высвобождением энергии электроустановки. Причем величина этой энергии будет определяться мощностью и временем воздействия на объект.

Рассмотрим сущность методики прогнозирования интегрального риска электроустановки, выделяя следующие этапы:

1.Определение цели и области применения. Целью оценки интегрального риска на первом этапе является качественная сравнительная степень опасности однотипных объектов (электроустановок), относящихся к сложным техническим системам (СТС). Такие системы, подпадающие под действие Федерального закона от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании», в соответствии с [4] носят название объекты технического регулирования (ОТР). Эти объекты широко распространены и относительно просты в сравнении с особо опасными и критическими производствами (атомная энергетика, химическая промышленность и т.д.) сравнительно несложно поддаются декомпозиции на конкретные структурные составляющие или отдельные технологические операции.

2. Формирование интегрального риска электроустановки. Этому должно предшествовать моделирование сценариев возникновения и распространения высвободившейся энергии электроустановки в результате возникновения аварии или ее отказа. В этом случае следует учитывать интенсивность отказов электрооборудования или технологической аппаратуры, включая электрозащитные средства, ошибки эксплуатационного персонала, а также метеорологические и другие условия среды (рис. 1).

Необходимо составить функционально-морфологическое описание системы (Ч – ЭУ – С), установить их связи между компонентами, дать описание условий окружающей среды. Непосредственными источниками опасностей являются генераторы, трансформаторы, электродвигатели, электротехнологические установки, сети освещения и электропроводка, устройства релейной защиты и автоматики.

3. При идентификации опасности следует руководствоваться статистическими данными о случаях электропоражений людей, травматизма животных, характеристиками надежности электроустановок и т.п. Представляется необходимым располагать данными о возможных зонах и рискообразующих факторах, приводящих к опасным последствиям. Для определения и описания этих опасностей следует использовать достаточно простые семантические схемы и эмпирические данные для построения диаграмм «дерево событий» и «дерево исходов».

4. При оценки величины риска, согласно [9], используются методы качественного и количественного анализа. В начале приводится анализ возможных причин электропоражения, пожара, отказов и т.п. с целью определения вероятности (частоты), продолжительности воздействия на субъект (человека) или объект (электроустановку). Оценку частоты или вероятности причиненного ущерба, например, вызванного электротравмой, следует проводить, используя при этом первичные критерии электробезопасности [10], в случае пожара – с учетом объема выделившейся энергии электроустановки [11].

Что касается прогнозирования интегрального ущерба от аварий электроустановки, электропоражений людей, пожаров и т.д., то он может быть определен путем расчета среднего ущерба в предположении, что за время T (принимаемое за один год) на k-ой электроустановке, принадлежащей однородному множеству n электроустановок, могут произойти какие-либо перечисленные выше события. Тогда средний интегральный ущерб определяется как математическое ожидание социального, материального и экологического ущерба

, (5)

где k=1 …n – число однотипных электроустановок, в которых произошли опасные события (аварии, электропоражение, пожар); Pk и Yk – вероятности случайных опасных событий в k-ой электроустановке за время T и соответствующий средний ущерб.

Остановимся более подробно на прогнозировании социального ущерба, вызванного гибелью человека. Вполне логично предположить, что этот ущерб будет эквивалентен той недополученной доле прибавочной стоимости, которая при этом теряется как отдельным производством, так обществом в целом. Согласно [6] издержки от гибели людей на производстве колеблются в весьма широких пределах. Так, стоимость статистической жизни человека (ССЖЧ), в основе которой лежит теория человеческого капитала [12] совпадает с размерами страховых компенсаций за гибель людей, инвестициями общества на снижение риска преждевременной смерти человека. Однако ССЖЧ в США равна 4,8 млн. долл., для нашей страны – 0,4 – 0,5 млн. долл. Можно предположить, что низкая ССЖЧ является основной причиной традиционно высокого производственного травматизма в России. Экономический ущерб, вызванный инвалидизацией или временной потерей трудоспособности персонала из-за несчастных случаев следует оценивать числом человека-дней, необходимых для лечения, реабилитации пострадавших, компенсационных выплат. Согласно рекомендациям МОТ, ущерб от гибели одного работника оценивается 7500 – 6000 потерянных обществом человека-дней, а ущерб от увечий различной степени тяжести колеблется в пределах от 2600 до 1100 человека-дней.

Таким образом, используемые в настоящее время методики оценки ущерба от производственного травматизма, в основе которых лежит монитарный подход к стоимости среднестатистической жизни человека или натуральный – выраженный в потери человека-дней, позволяют априорно определить затраты на предупреждение травматизма и ущерб от них. Последнее позволяет преодолеть проблему обоснования приемлемого риска, используя соответствующие оптимизационные приемы.

Литература

1. Основы электромагнитной совместимости: учебник для вузов / под ред. Р.Н. Карякина: Алт. гос. тех. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: ОАО «Алтайский полиграф.комб.». 2007. – 480 с.
2. Мартынюк В.Ф., Лисанов М.В., Кловач Е.В., Сидоров В.И. Анализ риска и его нормативное обеспечение // Безопасность труда в промышленности. 1997, №10. – С.39-42.
3. Белов П.Г. Теоретические основы системной инженерной безопасности. – М.: ГПНТБ «Безопасность», 1996. – 426 с.
4. Прочность, ресурс, живучесть и безопасность машин / Отв. ред. Н.А. Махутов. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2008. – 576 с.
5. Хенли Д., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска. Пер. с англ. – М.: Машиностроение. 1984. – 528 с.
6. Алымов В.Т., Тарасова Н.П. Техногенный риск. Анализ и оценка: учебное пособие для вузов. – М.: НКЦ «Академкнига», 2005. – 118 с.
7. Еремина Т.В. Вероятностный анализ безопасности сельских электроустановок. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2010. – 215 с.
8. Дюбуа Д., Прад А. Теория возможностей // Приложения к представлению знаний в информатике: пер. с франц. – М.: Радио и связь, 1990. – 288 с.
9. ГОСТ Р 51901.1.2002. Управление надежностью. Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем.
10. Киселев А.П., Власов С.П. К вопросу о критериях электробезопасности // Промышленная энергетика, 1997, №5. – С. 39-43.
11. Смелков Г.И., Пехотиков В.А. Пожарная безопасность электропроводок. – М.: Энергосервис, 2012. – 288 с.
12. Белов П.Г. Социально-экономические аспекты нормирования техногенного риска / Стандарты и качество, 2007, №1. – С. 24-29.

**Черкасова Нина Ильинична** – к.т.н., доцент, зав. кафедрой «Электроэнергетика» Рубцовский индустриальный институт Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, 658207, г. Рубцовск, ул.Тракторная 2/6, каф. ЭЭ,

тел.: (838557) 5-98-75, E-mail: 4ercas@bk.ru

**Никольский Олег Константинович** – д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Электрификация производства и быта» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, 656038, г. Барнаул, пр-т Ленина 46, каф. ЭПБ, тел.: (385-2) 36-71-29, E-mail: elnis@inbox.ru

**Семичевский Петр Иванович** – к.т.н., профессор кафедры «Электроснабжение сельского хозяйства» Московского государственного агроинженерного университета им. В.П. Горячкина, 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, 58, каф. ЭСХ, тел. (499) 976 36 40.