Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»
==========

УДК 621.31

Метод оценки и прогнозирования остаточного ресурса электроустановок в человеко-машинных системах

Никольский О.К.[1], Фараносов В.В.[1], Суринский Д.О.[2], Смолин Н.И.[2]

[1]Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова

[2]Государственный аграрный университет Северного Зауралья

Аннотация

Надежность функционирования систем электроснабжения и технического электрооборудования на объектах агропромышленного комплекса в значительной мере зависит от их технического состояния. В процессе эксплуатации в результате воздействия различных негативных факторов, режимов и условий работы исходное техническое состояние электроустановок (ЗУ) непрерывно ухудшается, возникает вероятность отказов и аварий, которые могут привести к опасным последствиям (пожарам, электропоражениям людей и т.д.). Кроме того, существует устойчивая тенденция старения основных фондов в сельском хозяйстве и значительное увеличение доли изношенного электрооборудования, со сроком службы превышающей предельно-допустимый.

Ключевые слова: ТОКИ УТЕЧКИ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ, ТЕХНОГЕННЫЕ ПОЖАРЫ, ТЕПЛОВАЯ ПЕРЕГРУЗКА, ЧЕЛОВЕКО-МАШИННАЯ СИСТЕМА.

В последние годы в агроинженерной сфере был выполнен комплекс исследований влияния человеческого фактора (электротехнического персонала операторов) на состояние техногенной безопасности, вызванной воздействием электрического тока и электромагнитного поля. Эти исследования позволили предположить, что нормальное функционирование электроустановок обеспечивается не только с помощью персонала, но и на основе использования модели человеко-машинной системы в результате взаимодействия её компонентов («человек», «электроустановка», «среда»), ЧМС «Ч-Э-С» [1, 2].

Эффективность УЧМС «Ч-Э-С» определяется надежностью функционирования человека — оператора и её подсистемы (электроустановки), а также факторами рабочей среды. Определение надежности электротехнического персонала (человеческий фактор) как вероятности безошибочности выполнения своих профессиональных обязанностей должно проводиться на основе информационно-энергетической модели, в результате анализа которой необходимо выявлять условия правильности принятия решений и установления их количественных критериев.

Надежность электроустановки характеризуется её свойством выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных параметров, соответствующих заданных режимом. Поэтому надежность, обладающая комплексным свойством, включает в себя параметры безотказности и долговечности, отражающие ресурс электроустановки.

Рассмотрим основные методы прогнозирования остаточного ресурса электроустановки, как компоненты человеко-машинной системы «Ч-Э-С». Выделим из них: а) метод экспертных оценок, применяемый при отсутствии достоверной информации об условиях эксплуатации электроустановки на производственном объекте; б) метод, основанный на экстраполяции и используемый при наличии исходных данных и отсутствия общей закономерности изменения состояния электроустановки; в) метод моделирования, используемый при наличии достаточного объема статистических данных об изменении состояния однотипных электроустановок в процессе эксплуатации.

Основой для оценки и прогнозирования технического состояния электроустановок, а, следовательно, и остаточного ресурса, является математическое моделирование, при котором по многомерному вектору состояния S (S_1, S_k, ..., S_n), определенного в моменты времени t_1, t_2, ..., t_n, необходимо идентифицировать его в последующие моменты времени. Математическое моделирование ресурса основывается на определенной тенденции изменения параметров их состояния, основные закономерности которой можно выразить в виде некоторой временной функцией. При этом будем считать, что эта зависимость является трендом, выражающим усредненную во времени для заданного периода наблюдения тенденцию и может быть экстраполирована на последующий период эксплуатации электроустановок.

При разработке методики расчета надежности или ресурса электроустановки необходимым является моделирование каждого узла, входящего в её структурную схему (конструкционные, токоведущие и изоляционные элементы). Возникающие при этом отказы

ЭУ, являясь случайными событиями, могут быть описаны методами теории вероятностей и математической статистики.

Для примера в качестве ЭУ рассмотрим эксплуатацию в условиях сельскохозяйственного производства асинхронного двигателя, остаточный ресурс которого (из-за перепада температуры, наличия агрессивной среды, высокой влажности и др.) значительно ниже нормативного; наименее надежным является обмотки двигателя, отказы которых составляют 95-98% от общего количества отказов [3]. Причем, отказ происходит тогда, когда напряжение, приложенное к соседним проводникам обмотки, превышает пробивное напряжение межвитковый изоляции в данном месте. В этом случае вероятность безотказной работы элемента межветковой изоляции определяется

$$\text{Р}_\text{э} = \int_0^\infty \int_{ns}^\infty f\,(U_\text{в})\; g\,(U_c)\; dU_\text{в}\; dU_c, \qquad (1)$$

где $f\,(U_\text{в})$ и $g\,(U_c)$ — плотности распределения пробивного и приложенного напряжения соответственно.

Рассмотрим процесс ухудшения токоведущих и изоляционных частей электроустановки, приводящий к функциональным и структурным отказам.

Среди различных факторов, определяющих остаточный ресурс электроустановки, выделим основные из них — старение и износ в результате воздействия факторов рабочей среды.

Воздействие температуры характеризуется: а) теплоустойчивостью — способностью ЭУ сохранять свои рабочие свойства при относительном кратковременном перегреве; при этом токоведущие и изоляционные материалы не должны разрушаться, менять свои химические свойства и препятствовать возникновению пластической деформации и разрушению, б) нагревостойкостью — способностью материала без существенного ухудшения характеристик выдерживать воздействие предельно допустимой температуры в течение периода времени, соответствующего сроку службы электроустановки.

Воздействие электрического поля. В процессе эксплуатации электроустановка длительное время находится под рабочим напряжением, причем, периодически испытывает воздействие повышенных напряжений при профилактических испытаниях и атмосферных явлениях. Под влиянием тепловых и электрических воздействий происходит деградация, старение и разрушение токоведущих и изоляционных элементов. В изоляции возникают ионизационные процессы, приводящие к разрушению; возникающие частичные разряды

сопровождаются химическими реакциями и локальным пробоем, завещающим выходом из строя изоляции и возникновением угрозы электропоражения персонала. Влияние электрического поля на срок службы электроустановки исследовано недостаточно. Известна, так называемая «кривая жизни» (рис. 1): деградация и старение выражается в смещении «кривой жизни», параллельно её исходному состоянию (характеристика 1) перемещается влево. Характеристики выражают зависимость времени Т до пробоя образца от величины приложенного напряжения Е.

Воздействие механических нагрузок. Одним из основных факторов старения и разрушения частей электроустановки являются механические и термомеханические нагрузки. К первым относятся статическое давление, изгибающие и скручивающие усилия, удары и вибрация. Термомеханические нагрузки возникают в результате периодических нагревов и охлаждений частей электроустановки. Источниками механических воздействий являются электродинамические силы, неуравновешенность вращающихся частей, центробежной силы, толчки и удары, передаваемые со стороны приводов и механизмов. В большинстве случаев перечисленные негативные факторы имеют циклический, знакопеременный характер, причем наиболее типичной является возникновение вибрации с частотой 100 Гц. При переходных процессах (пуск, реверс) и возникновении коротких замыканий амплитуды вибрации увеличиваются в десятки раз, что приводит к росту тока в обмотке двигателя.

Воздействие влаги и химически активных веществ. Под действием влаги происходит гидролитическое разрушение изоляционных и токоведущих материалов. Периодическое проникновение и удаление влаги увеличивают пористость изоляции и появление коррозии токоведущих частей. Эти процессы развиваются параллельно и взаимно стимулируют друг друга. Большой вред оказывают химически активные вещества: щёлочи, кислоты и их ангидриды, находящиеся в окружающей среде.

Ресурс — суммарная наработка электроустановки от начала её эксплуатации до перехода в предельное состояние, при котором возникает необходимость прекращение работы ЭУ.

Остаточный ресурс — суммарная наработка электроустановки от начала контроля её технического состояния до перехода в предельное (критическое), при котором дальнейшая эксплуатация становится невозможной.

Деградационный отказ обусловлен естественными процессами старения, изнашивания, коррозии и усталости при соблюдении установленных норм проектирования, изготовления и эксплуатации изделия.

Рассмотрим онтологическую модель ресурса электроустановки как специфическую базу знаний, включающую понятийно-терминологический аппарат и смысловой анализ, являющихся первичным условием формирования математической модели [4].

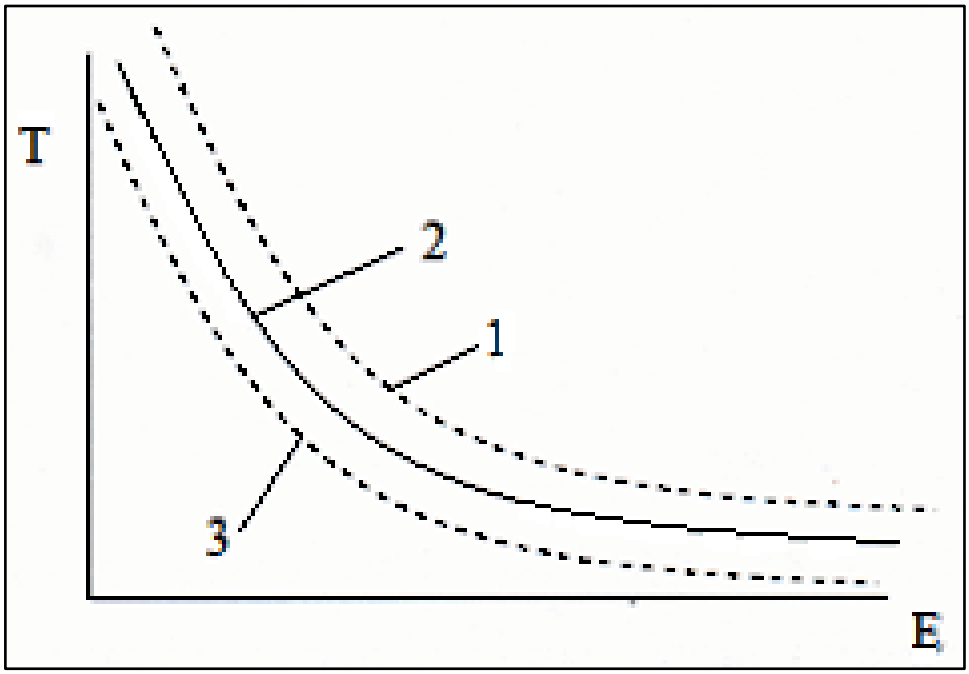

Рис. 1. Старение и деградация конструкционных частей электроустановки под воздействием факторов рабочей среды

Критичность отказа — совокупность признаков, характеризующих последствия отказа, приводящего к возникновению ОТС.

Функциональный отказ - состояние электроустановки, при котором невозможно выполнять предназначенные функции и поддерживать заданный (нормативный) уровень работоспособности изделия.

Полный отказ - состояние электроустановки, приводящее к утрате работоспособности и способности возникновения ОТС, в частности к электротравмам персонала.

Сформулированная концепция прогнозирования остаточного ресурса электроустановки предполагает одновременное наличие следующих условий: а) известны

характеристики и параметры компонентов человеко-машинной системы «Ч-Э-С»; 6) известны рискообразующие факторы (РОФ).

Одним из источников получения данных для прогнозирования остаточного ресурса является ретроспективная информация, требующая проведения специальных испытаний моделей или образцов. Для этого представим статистическую информацию об отказах электроустановки в виде временных хронологических рядов. Примем следующую вычислительную процедуру. Весь период эксплуатации ЭУ, начиная от её включения (t = 0) до момента окончания наблюдения ($t = t_Н$), разделим на К равных интервалов времени $\triangle t$=const. Каждому значению времени $t_j = j\triangle t$, (j = 1, 2, ..., n) соответствуют случайные значения показателя надежности $У_i$. В этом случае статистическая информация преобразуется в динамический ряд, для которого подбирается прогнозирующая модель.

С определенной степенью допущения для исследуемого временного ряда можно построить линейную модель вида

$$Y_p = \sum_{p=1}^{i} a_i y_p + \mathrm{E}_i \qquad (2)$$

где p — порядок регрессии, a; — весовые коэффициенты, E_i — совокупный коэффициент аппроксимации. Аппроксимируя полученную модель, строим соответствующий тренд, экстраполируя который, можно получить прогноз показателя надежности и оценку остаточного ресурса электроустановки (рис. 2).

Выбор диагностических параметров электроустановки. Примем, что базовой характеристикой технического состояния электроустановки являются диагностические параметры (ДП), представляющие собой совокупность количественных показателей, отражающих конструкционные, изоляционные и токоведущие свойства ЭУ. При этом значения ДП можно оценивать путем их измерения или расчета.

К диагностическим параметрам ЭУ отнесем: а) по токоведущим свойствам: сопротивления токоведущих цепей ($Z_{тц}$); сопротивления контактов и клеммных соединений ($Z_{конт}$); температура контактов ($t^{\circ}_{конт}$); б) по изоляционным свойствам - сопротивления изоляции ($Z_{из}$); дифференциальный ток утечки на землю ($I_{ут}$), коэффициент абсорбции ($K_{абс}$), коэффициент поляризации ($K_{пол}$) [4, 5].

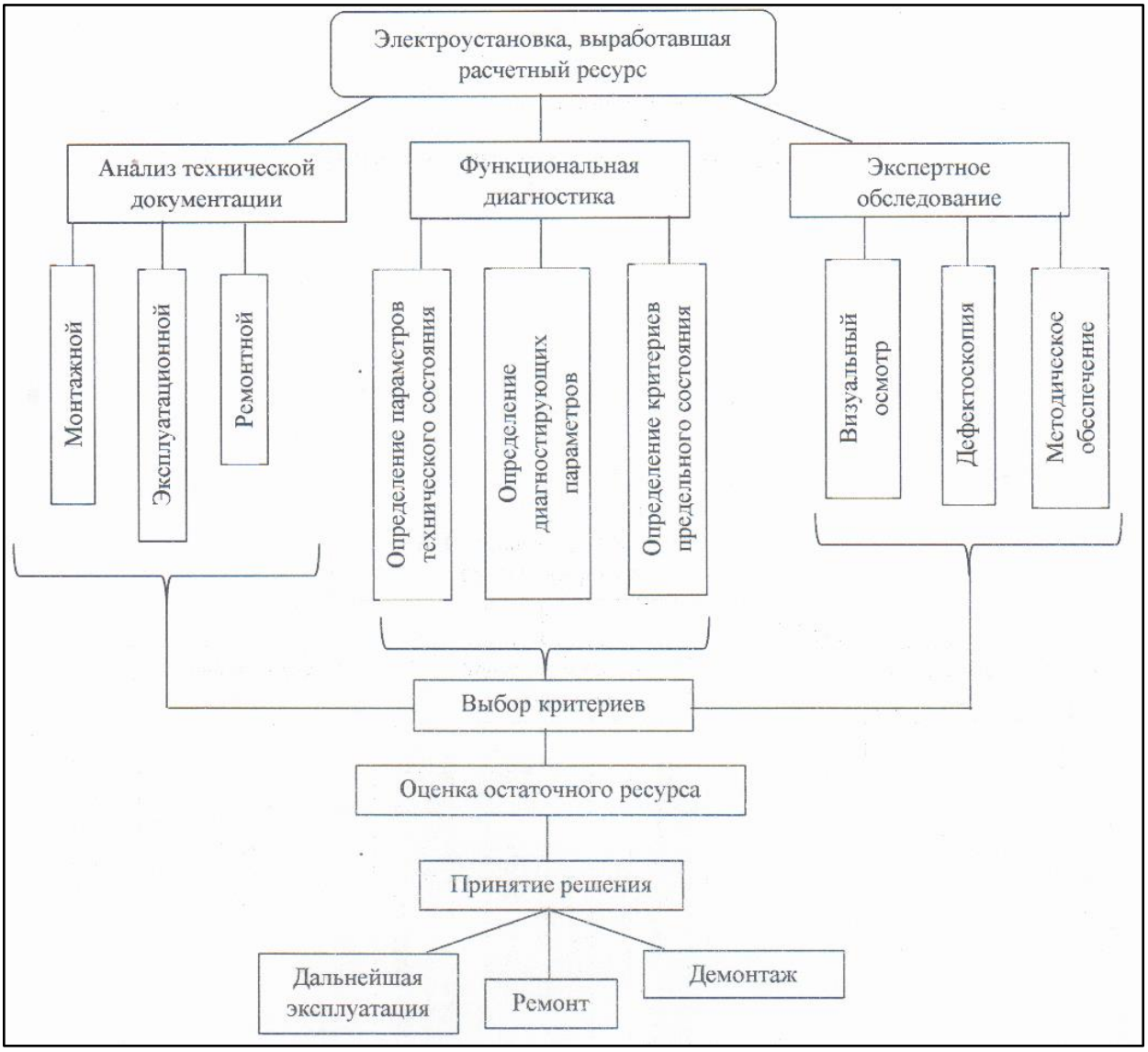

Рис. 2. Структурная схема оценки остаточного ресурса электроустановки

Формализованное описание процесса старения и функциональных отказов токоведущих и изоляционных частей ЭУ может быть представлено в виде структурной схемы влияния рискообразующих факторов человеко-машинной системы на формирование зависимости $F = f(t)$, где F — функциональный отказ ЭУ. Тогда вероятность безотказной работы $Q(t)$ можно представить в виде следующего разложения:

$$Q(t) = F_{\text{тр}}(t) + \sum_{k=1}^{n} a_k\, f_k\,(t) + z\,(t), \qquad (3)$$

где $F_{\text{тр}}(t)$ — функция тренда, обусловленная физической природой процесса старения ЭУ, характеризующая динамику изменения какого-либо диагностического параметра ДПi; $f_k\,(t)$ – функция, формирующая изменения диагностического параметра, обусловленного

действием какого-то рискообразующего фактора; a_k — коэффициент, принимающий значения 1 или 0, в зависимости от того, участвует ли в формировании значений $Q(t)$ РОФк, вывод об учете которого принимается экспертом; $z\ (t)$ - результат воздействия случайных факторов, не поддающихся учету и оценке.

Теоретическое обоснование модели остаточного ресурса электроустановки. Представим кинетическую модель *F(t)* старения и разрушения электроустановки производственного объекта в зависимости от времени её эксплуатации (рис. 3). Выделим здесь три характерных периода [6, 7]. В первый начальный период эксплуатации функция *F(t)* возрастает монотонно по экспоненте. В конце второго периода происходит замедление роста и функция *F(t)* статистической линейкой, а также наблюдается стабильная интенсивность старения ЭУ. В третьем периоде по мере накопления кинетических повреждений скорости разрушений начинают увеличиваться и возрастают вплоть до возникновения отказа. Продолжительность времени до возникновения отказа определяется условиями эксплуатации электроустановки на производственном объекте.

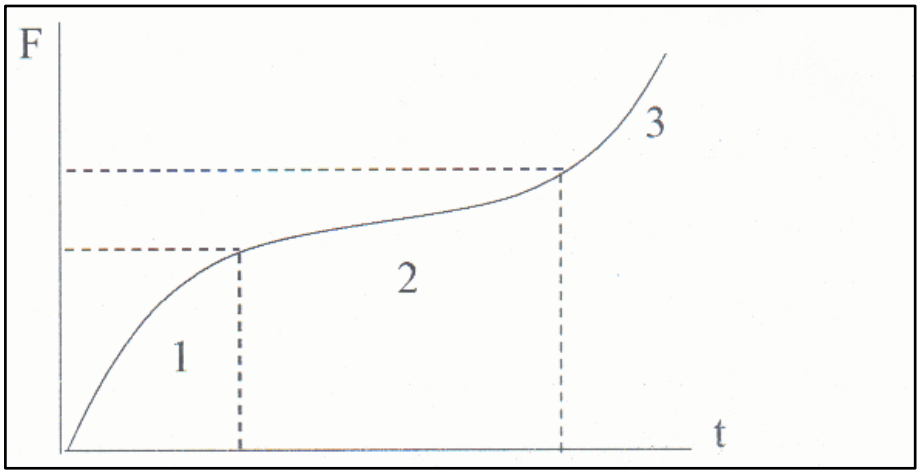

Рис. 3. Кривая старения и разрушения электроустановки

Примечание: 1 — область приработки; 2 — область стабилизации; 3 — область разрушения/отказа.

Одним из направлений, определяющих повышение качества информационных технологий контроля и диагностирования технического состояния ЭУ, является интеллектуализация процессов обработки исходных данных и создания на этой основе базы знаний для оценки остаточного ресурса.

Учитывая объективно существующую неопределенность, неполноту и нечеткость информации об объекте при разработке базы знаний и механизма вывода экспертных систем, в работе рассмотрено использование аппарата нечетной логики [8, 9]. Практический опыт разработки систем, построенных на нечетных множествах, показывает, что стоимость их проектирования значительно ниже, чем при использовании традиционного математического аппарата.

Модель для определения остаточного ресурса электроустановки включает структурную схему разработанной экспертной системы для оценки и прогнозирования остаточного ресурса и проведения инструментального контроля диагностических параметров (рис. 4).

Концепция оценки остаточного ресурса электроустановки (ORЭУ), входящей в ЧМС «Ч-Э-С», строится на предположении, что техническое её состояние изменяется по заданному сценарию и к моменту времени t может относиться к одному из возможных. В этом случае динамика отказа определяется признаками деградации, кинетикой и механизмом развития дефекта (рис. 4).

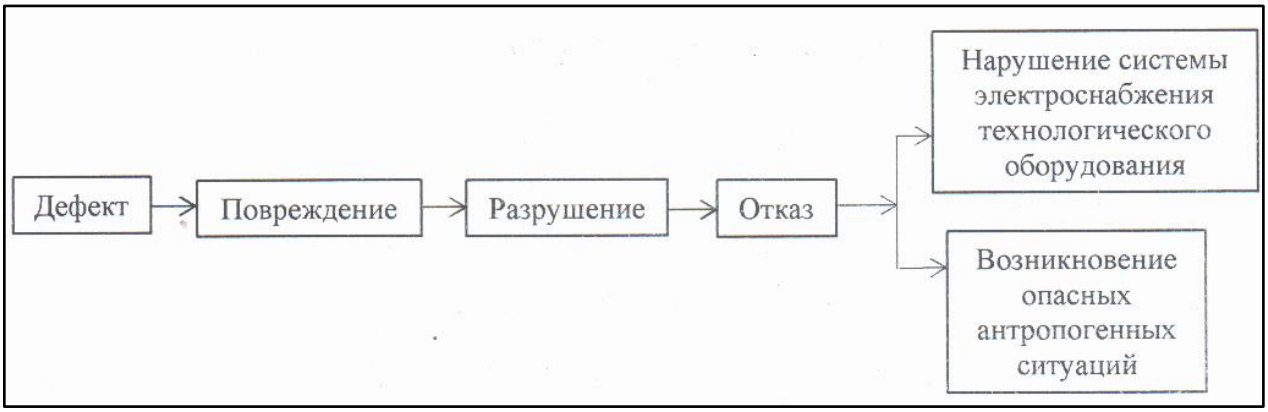

Рис. 4. Динамика изменения ресурса ЭУ

Таким образом, прогнозирование электроустановок производственных объектов является важным мероприятием, которое позволяет решать совокупность практических задач, среди которых - определение текущего состояния электрооборудования и его ресурса, идентификация антропогенных рисков и определение причины появления неисправностей, что, в конечном итоге, позволяет принимать адекватные управленческие решения.

Выводы

Разработан метод оценки остаточного ресурса электроустановок человеко-машинной системы «Ч-Э-С», в основе которого лежит многопараметрическая модель процесса старения и износа токоведущих и изоляционных частей ЭУ.

Метод позволяет прогнозировать техническое состояние электроустановок по диагностическим параметрам до достижения их критических значений и создает предпосылки анализа техногенных рисков и оптимизации системы обеспечения безопасности.

Метод реализуется на основе разработанного алгоритма, с помощью которого представляется возможность продлить срок службы технологического электрооборудования за пределы нормативных значений, либо вывести в ремонт или заменить при возникновении опасной ситуации (пожара, аварии, электропоражения).

Список использованных источников:

1. Никольский О.К., Воробьев Н.П., Еремина Т.В., Костюков А.Ф., Калинин А.Ф., Тушев А.Н. Теория и практика управления техногенными рисками [Текст]: учебн. пособие для студ. высш. учеб. заведений. - Барнаул, Изд-во АлтГТУ, 2015. - 219 с.

2. Никольский О.К., Шлионская Ю.Д., Шаныгин И.А. Моделирование техногенных рисков электроустановок производственных объектов на основе анализа человеко-машинных систем // Электротехника. - № 12. – 2018. - С. 37-44.

3. Никольский О.К., Воробьев Н.П., Куликова Л.В., Мартко Е.О., Боярков Д.А. Методология управления техногенными рисками опасности электроустановок на объектах АПК [Текст] // Достижения науки и техники АПК. – Москва. - 2017. - Т.31. - № 3. - С. 58-64.

4. Никольский О.К., Вабова М.А. Онтологический анализ техногенного риска опасностей электроустановок // Весник Алтайского государственного аграрного университета. - 2021. - № 4 (198). - С. 116-123.

5. Никольский О.К., Воробьев Н.П. и др. Техническая диагностика и остаточный ресурс электроустановок: Монография - Барнаул, Изд - во, «Алтайский дом печати», 2013. - 207 с.

6. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. — М: Мир, 1976. - 167 с.

7. Bagaev A., Kulikova L., Kunitsyn R. Influence of inclination angle of piezoelectric receiver of ultrasonic sensor on the error in measurement of the average fiber diameter // International Scientific and Practical Conference on Modern Problems of Ecology, Transport and Agricultural Technologies. - 2020. - Vol. 113. - No. 124. DOI: 10.1088/1757-899X/941/1/012050.

8. Никольский О.К., Фараносов В.В., Суринский Д.О. Контроль и предотвращение пожаров от токов утечки в электроустановках производственного объекта [Электрон.

ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. - 2022. - № 5. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/5/st_538.pdf.

9. Shirobokova T., Surinsky D., Egorov S. Modeling of led luminaires with optimal temperature operation of leds // Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling. - 2021. - Vol. 174. - No. 529. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/5/052093.

==========

Цитирование:

Никольский О.К., Фараносов В.В., Суринский Д.О., Смолин Н.И. Метод оценки и прогнозирования остаточного ресурса электроустановок в человеко-машинных системах [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2023. – № 3. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2023/3/st_318.pdf.
DOI: https://doi.org/10.51419/202133318.