

Никольский О.К., Фараносов В.В., Суринский Д.О., Усков Е.В.
Методы анализа безопасности электроустановок в человекомашинных системах

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

УДК 621.31

**Методы анализа безопасности электроустановок в человекомашинных
системах**

Никольский О.К.¹, Фараносов В.В.¹, Суринский Д.О.², Усков Е.В.²

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

²Государственный аграрный университет Северного Зауралья

Аннотация

Повышение интенсификации сельскохозяйственного производства и улучшение качества жизни сельского населения является приоритетным в развитии аграрного сектора экономики страны. В связи с этим проблема снижения антропогенных угроз аварий и травматизма людей, пожаров, а также повышения надежности и безопасности электроустановок, в том числе электрических сетей и технологического электрооборудования является в настоящее время важной и своевременной. Особенно остро стоит эта проблема в результате старения основных фондов отрасли. Электроэнергетический парк АПК России в основном состоит из отработавшего свой ресурс электрооборудования, износ которого превышает критический уровень (~ 70%).

Состояние техногенной безопасности электроустановок сегодня нельзя признать удовлетворительным. Ежегодно только в коммунальном секторе гибнет более 4500 человек, около 30 тысяч - получают инвалидность, при этом на долю села приходится около 70 % от общего числа электротравм. Серьезную угрозу представляют также пожары, возникающие от электрического тока в результате коротких замыканий и повреждения изоляции электропроводки. Сложившаяся ситуация представляет угрозу национальной безопасности страны, что вызвало необходимость включения проблемы техногенной безопасности в перечень критических технологий, утвержденных Президентом РФ в 2002 году.

Ключевые слова: ЭЛЕКТРОУСТАНОВКА, РИСК, ЧЕЛОВЕКОМАШИННАЯ СИСТЕМА, МЯГКИЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ, УЩЕРБ, ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА

Одним из основных способов предотвращения аварий и травматизма является техническое диагностирование электрических сетей и оборудования. Действующая нормативная база предусматривает выполнение измерения сопротивления изоляции (1 раз в 2 года) и визуальный осмотр, что является явно недостаточным. Сама система эксплуатации сельскохозяйственных электроустановок (ЭУ) ограничивается лишь фактом констатации отказа и аварии, и не направлена на их предупреждение [1].

Известно, что эксплуатация ЭУ (электродвигатели, электропроводка и т.д.) в сельскохозяйственном производстве сопровождается совокупностью неблагоприятных факторов, в частности, высокой влажностью, нестабильностью, температуры, агрессивностью среды, специфическими режимами работы электрооборудования, которые негативно действуют на полимерную изоляцию, разрушая её в итоге.

В основе существующих методов диагностирования технического состояния электроустановок лежат либо инструментальные способы, либо физические или математические модели. В первом случае применение измерительной аппаратуры (например, интроскопия), связанной с визуализацией физических процессов в ЭУ в виду высокой стоимости, экономически не оправдано. Использование методов физического моделирования (натурные эксперименты) неприемлемо, поскольку речь идет таких опасных явлениях как электропоражение человека или авария в системе электроснабжения производственного объекта. Методы математического моделирования предполагают введение критериев - количественных показателей для характеристики уровня антропогенной опасности или эффективности превентивных мер.

Одним из показателей опасности, широко используемый в научной литературе, является риск [2]. В настоящее время риск рассматривается как объект междисциплинарных исследований. Изучение феномена риска связано с отказом от детерминистического подхода к анализу антропогенной опасности, в основе которого лежит построение «жестких» функциональных моделей, обычно дифференциальных уравнений. В соответствии с современными представлениями техногенный риск можно трактовать как некоторую вероятностную меру возникновения опасности в электроустановке (например, электротравмы) в сочетании с последствием - нанесенного материального ущерба или социального вреда [3]. Эти два компонента взаимосвязаны и создают условия неопределенности, непредсказуемости (рис. 1).

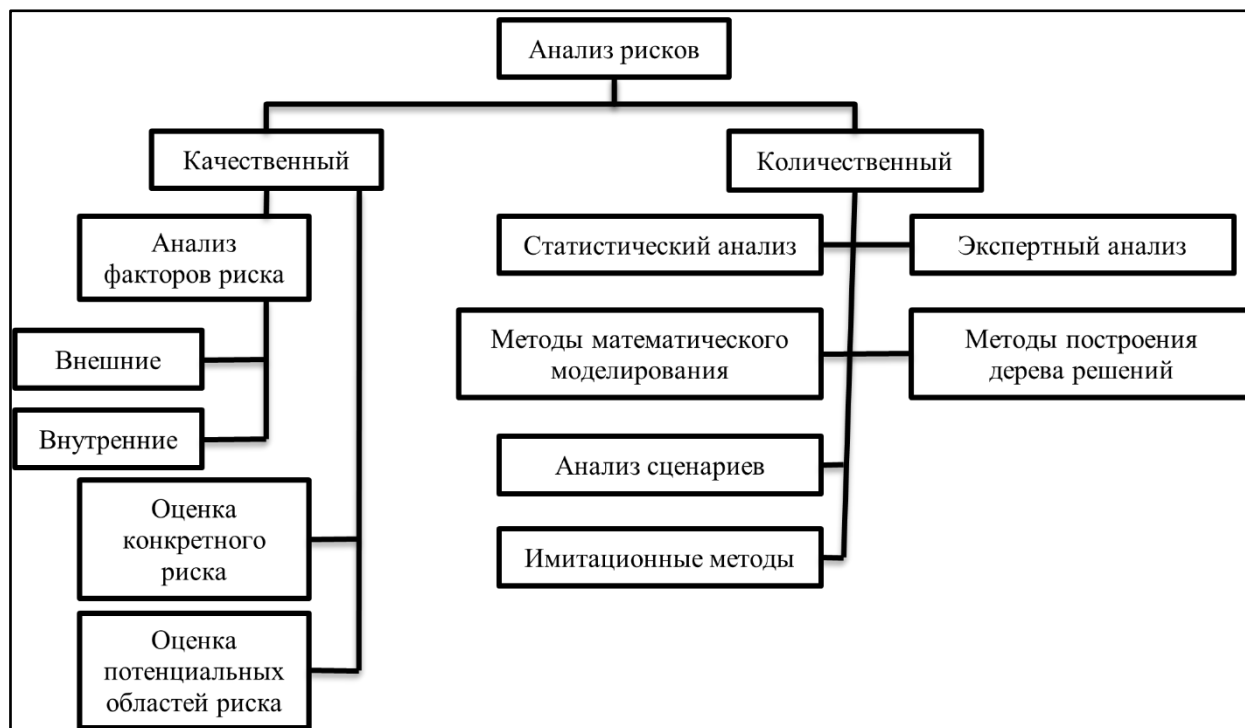


Рис. 1. Методы анализа и оценки антропогенного риска электроустановок человекомашинной системы

На основании анализа статистических данных установлено, что возникновению опасной антропогенной ситуации (ОАС) предшествует цепь инициирующих событий - предпосылок, вызванных: 1) ошибками или неправильными действиями человека (персонал, население); 2) отказами электроустановки производственного объекта, включая электрическую защиту; 3) негативным (сверхнормативным) воздействием факторов внешней среды. Несмотря на то, что перечисленные предпосылки являются случайными, можно установить присущие им закономерности. Во-первых, возникновение каждого антропогенного происшествия следует рассматривать как следствие не отдельной причины, а результат появления цепи соответствующих предпосылок. Во-вторых, все виды опасностей, возникающие в электроустановках, можно интерпретировать как поток случайных событий, количество которых на ограниченном интервале времени (например, одного года) подчиняется закону Пуассона, а время между появлением отдельных происшествий - экспоненциальному распределению.

Изложенные соображения позволили выдвинуть следующую гипотезу: в основе анализа антропогенной безопасности электроустановок сельскохозяйственного объекта (предполагая оценку, управление и оптимизацию риска) должно лежать рассмотрение

сложной динамической человекомашинной системы, в состав которой входят следующие компоненты: человек (Ч), электроустановка (ЭУ) и среда (С). Причем, эта система функционирует в условиях неопределенности, проявляющейся в неполноте исходных данных, неточности экспериментальных результатов, вызванных невозможностью получения идентичности проведения опытов, а также ненадежностью (размытостью) информации, связанной с отсутствием формализованных моделей описания поведения «человеческого фактора». К этому следует добавить также отсутствие методов априорного моделирования ЧМС (Ч-ЭУ-С) в реальном масштабе времени. Причиной тому является сложная структура и многоцелевой характер функционирования системы, наличие информационных и энергетических связей между компонентами с нелинейными характеристиками. Поэтому традиционные методы идентификации и оценки опасностей не могут быть положены в основу моделирования такой сложной системы, которой является рассматриваемая нами ЧМС. Отсутствие методов диагностирования и прогнозирования антропогенных рисков электроустановок производственного объекта приводит к тому, что персоналу приходится принимать интуитивные решения по предотвращению опасных происшествий: своевременно отключить электроустановку, вывести оборудование на профилактику или в ремонт. Поэтому поиск и разработка новой методологии анализа рисков ЧМС в условиях неопределенности путем использования процедур «мягких» приближенных вычислений является, по нашему мнению, единственно возможным. Представление неопределенной информации с помощью нечетких моделей, построенных на многообразии семантики и структуры естественного языка, является наиболее приемлемой для формализации знаний об объекте исследования.

Таким образом, целью исследования является повышение эффективности диагностирования технического состояния электроустановок объектов АПК для предупреждения аварий, электротравматизма и пожаров, создания безопасных условий труда в сельском хозяйстве.

Согласно [4-6], процедура выполнения мягких вычислений (МВ) предполагает использование определенных математических инструментов, среди которых можно назвать нечеткие множества (НМ) и нечеткую логику (НЛ).

Процесс функционирования человекомашинных систем может быть описан в терминах ограниченного естественного языка и представлен с помощью лингвистических переменных (ЛП), значениями которых могут быть числа и слова (словосочетания)

какого-либо естественного или искусственного языка. По своей сути, ЛП представляет собой дескриптивный кортеж

$$LV = [L, T, X, G, M] \quad (1)$$

где: L - имя переменной; T - множество её значений (терм-множество); X - универсальное множество нечётких переменных; G - синтаксическая процедура образования новых термов, позволяющая из простых атомарных термов строить составные термы, $G: T \rightarrow T^*$, где T^* - расширенное терм-множество; M – семантическая процедура, формирующая нечеткие множества для каждого терма T каждой лингвистической переменной. Другими словами, лингвистическая переменная - это описательная иерархическая модель, включающая «понятие» - «его значение» - «смысл».

Например, понятие «Величина» можно определять с помощью терм-множества T- (большая отрицательная (БО), средняя отрицательная (СО),..., Примерно нулевая (ПН),..., большая положительная (БП)). Таким образом, терм-множество представляет собой совокупность значений ЛП. Лингвистические переменные предназначены для анализа сложных плохо определенных объектов и явлений. Использование словесных описаний, которыми оперирует человек, делает возможным проведение структурного анализа человекомашинных систем вида (Ч-ЭУ-С). Нечёткая логико-лингвистическая система описывается набором значений входных и выходных ЛП, связанных между собой эвристическими правилами.

Одним из основных понятий теории нечетких множеств является функция принадлежности $\mu_X(x)$, представляющая собой некоторую не вероятностную субъективную меру нечеткости, определяемую по результатам опроса экспертов о степени соответствия элемента x понятию, формализуемому нечетким множеством X. В отличие от вероятностной меры, которая служит оценкой стохастической неопределенности, нечёткая мера является численной оценкой лингвистической неопределенности, связанной с неоднозначностью и расплывчивостью человеческого мышления.

При анализе антропогенных рисков ЭУ целесообразно использовать аналитическое представление функции принадлежности $\mu_X(x)$, нечётко обладающей множеством некоторых его свойств. В этом смысле представляет интерес типизация функций принадлежности в контексте указанного выше анализа риска, что существенно упрощает соответствующие аналитические численные расчеты при применении методов теории

нечётких множеств [7, 8].

Для формализованного описания рассматриваемой ЧМС может быть использована треугольная функция принадлежности (ФП), интерпретирующая неопределенности типа: «приблизительно равно», «среднее значение», «расположен в интервале» и т.п. Исходными данными для описания модели является совокупность признаков компонентов человекомашинной системы (рискообразующих факторов - РОФ), которые наиболее существенно влияют на создание АТС, а также максимально возможные значения индикаторов соответствующего вклада в образовании АТС и лингвистические (в т.ч. балльные) оценки каждого РОФ. При этом распределение этих факторов на соответствующей универсальной шкале задается функцией принадлежности $\mu_{\Delta}(x)$ и лингвистической переменной.

Иерархическая база знаний с определением влияющих рискообразующих факторов в виде лингвистических переменных позволяет учитывать значительную неопределенность входных данных человекомашинной системы (Ч-ЭУ-С). Построение нечеткой базы данных на основе экспертных оценок соответствует этапу структурной идентификации. Вместе с тем, получение экспертной информации и степень ее адекватности существенным образом зависит от профессионального уровня эксперта, что не гарантирует сходимости результатов теоретических (нечеткого логического вывода) и экспериментальных исследований. В этом случае используется этап параметрической идентификации на основе тонкой настройки нечеткой модели посредством ее обучения экспериментальным данным. Этап параметрической идентификации состоит в минимизации несоответствия получаемых результатов исследования теоретической модели и машинного эксперимента [9, 10].

Рис. 2 иллюстрирует функционирование человекомашинной системы. Модель представлена в виде

$$M = \{X, Y, Z, S, T, q, h\}, \quad (2)$$

где: M - пространства входных, выходных и возмущающихся воздействий;

$S = (s_1, s_2, \dots, s_k)$ - пространство состояний системы в момент времени $t \in T$;

$T = (t_1, t_2, \dots, t_i)$ - множество моментов времени;

q - оператор переходов, отражающий изменение состояния системы под воздействием внутренних и внешних возмущений;

h - оператор выходов, описывающих механизм формирования выходного сигнала как реакции системы на внутренние и внешние возмущения.

Входные воздействия $X(t)$ интерпретируются в виде заданных цели и функций, установленных интервалов времени и выделенных ресурсов, а также совокупности рискообразующих факторов; выходное воздействие $Y(t)$ проявляются как полезные (или вредные) результаты функционирования ЧМС; возмущающие воздействия $Z(t)$ - негативные факторы внешней среды (сверхнормативные нагрузки, параметры микроклимата, социально-экономические условия); $S(t)$ - состояния системы в определенный интервал времени.

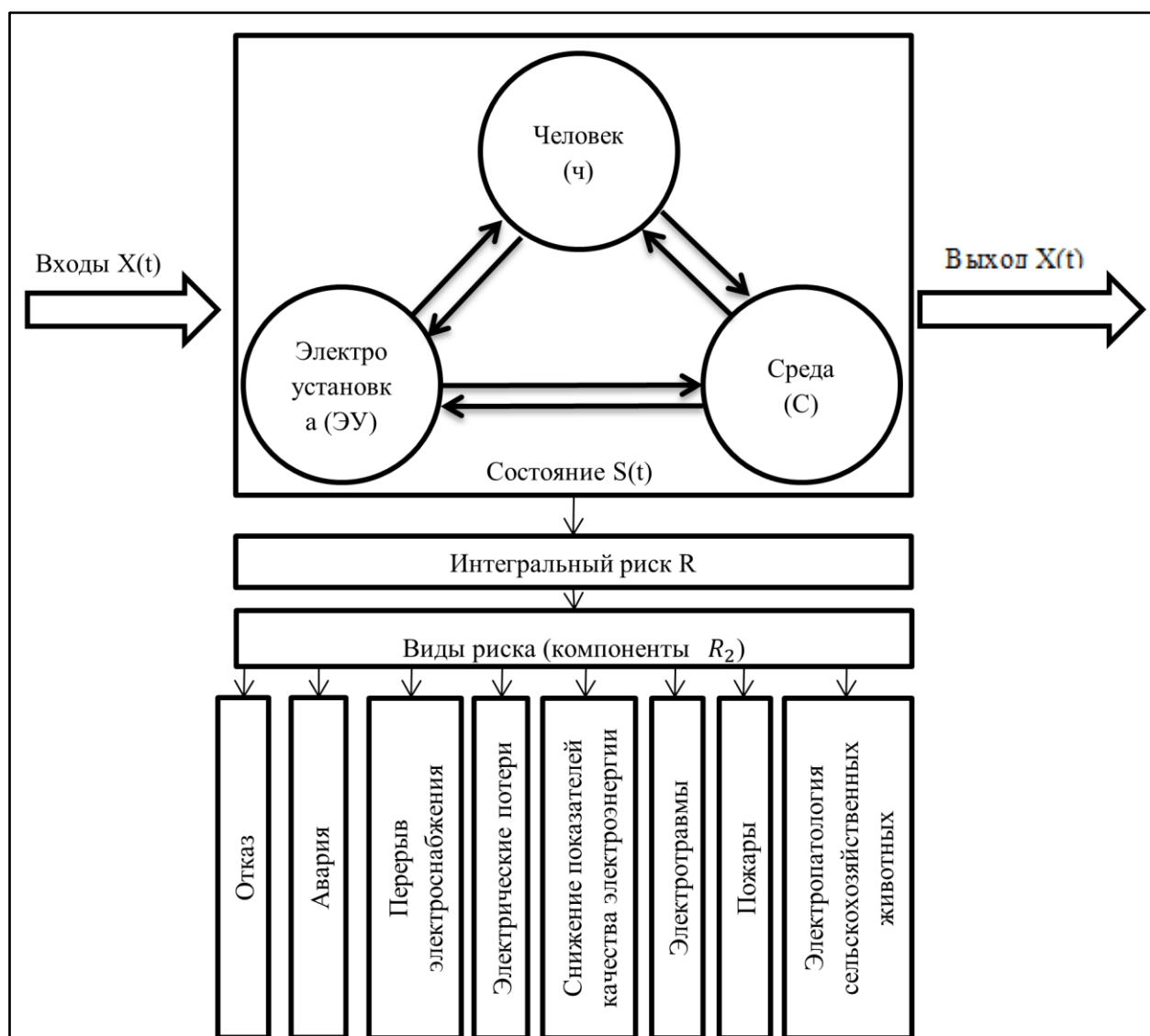


Рис. 2. Структурно-функциональная модель системы «человек-электроустановка-среда»

Состояние системы можно оценивать в виде динамического равновесия, при котором интегральные показатели находятся в гомеостазисе.

Такое состояние целевых систем (с заданной целью) обуславливается стремлением к их устойчивости. Поскольку диапазон внешних воздействий на систему не может быть неограниченным, поэтому и количество состояний также должно быть достаточно ограниченным. Причем, ограничение этих состояний определяется соотношением между энергией внешнего возмущения и собственной энергоемкостью системы. На наш взгляд, возможно, выделить следующие наиболее характерные состояния системы с разным уровнем воздействия факторов среды:

- низким - не превышающим пороговых значений энергии (система находится в состоянии гомеостазиса);

- допустимым - когда внешняя энергия незначительно превышает порогового значения, однако, накопление этой энергии не происходит, и она уменьшается в результате рассеяния или преобразования в тепловую энергию; возмущение проявляется в виде незначительных колебаний своих интегральных показателей, и система возвращается в состояние равновесия;

- опасным - приводящим систему к кризисному режиму функционирования. Под кризисом системы (Ч-ЭУ-С) будем понимать процесс ее адаптации к изменившимся внешним и внутренним условиям при сохранении ее системных свойств при незначительных ущербах;

- критическим - приводящим к состоянию катастрофы, которое сопровождается значительными изменениями интегральных показателей системы из-за радикальной перестройки ее структуры и морфологии. Катастрофическое состояние системы вызывает значительные аварии, человеческие жертвы и ухудшение экологической обстановки в результате пожаров.

Для иллюстрации использования базы логических высказываний рассмотрим фрагмент возникновения какого-либо головного события (см. рис. 1), используя при этом известное логическое правило «если ... то», например: ЕСЛИ - неправильные действия персонала - «редкие», И - уровень опасности возникновения аварийных режимов - «средний», И - эффективность средств защиты - «высокая», И - диагностирование технического состояния ЭУ - «эпизодическое», И - состояние условий труда - «удовлетворительное», ТО - головное событие (авария, пожар, электротравма) не

произойдет.

Детализируем структуру рассматриваемой имитационной модели с помощью дерева возникновения рисков, являющееся логическим методом локализации всех опасных компонентов системы (Ч-ЭУ-С). Выделим три опасных антропогенных ситуации, приводящих либо к аварии электроустановки (следствие - перерыв электроснабжения), либо к несчастному случаю (электротравме), либо к пожару, вызванному электротехнической причиной.

Выявление сценария возникновения той или иной ОАС должно основываться как на знаниях эксперта, так и на результатах моделирования изучаемого случайного явления. Например, используя диаграммы причинно-следственных связей (деревьев), можно воспроизвести процесс зарождения отдельных иницирующих событий и предпосылок и перерастания их в ОАС.

Дерево рисков (ДР) лежит в основе логико-вероятностной модели причинно-следственных связей отказов системы (как вида проявления опасности). При этом возникновение отказа (в трактовке ОАС) представляется некоторой последовательностью комбинаций нарушений и неисправностей. Поэтому дерево рисков можно рассматривать как многоуровневую графологическую структуру причинных взаимосвязей, полученных в результате прослеживания динамики развития антропогенных опасностей.

При построении ДР следует учитывать основные виды событий:

- результирующее (опасное происшествие), приводящее к недопустимому ущербу (потерям);
- промежуточное, возникающее при неблагоприятных условиях и являющееся одной из возможных причин результирующего события;
- базовое (иницирующее) - исходное, трактующееся как первичный отказ.

Таким образом, представленная в качестве иллюстрации диаграмма причинно-следственных связей между компонентами ЧМС отражает достаточно типичные процессы возникновения рисков электроустановок сельскохозяйственного объекта. Вместе с тем эта диаграмма не претендует на некоторое эталонное (стандартное) решение и в зависимости от постановки задачи может быть представлена большим или меньшим уровнем детализации (декомпозиции) рассматриваемой человекомашинной системы [11, 12].

Выводы

1. Эффективность функционирования человекомашинной системы (Ч-ЭУ-С) в условиях неопределенности исходных данных может быть выражена с помощью интегрального риска (R_2) - комплексного критерия, представленного в виде единого денежного эквивалента, что позволяет применить механизм оценки экономической эффективности при проведении оптимизации системы безопасности электроустановок. В основу критерия $R \sum$ положено мультипараметрическое описание динамического состояния системы, учитывающей, наряду с параметрами надежности, факторы, характеризующие ее безопасность, эргономичность и экономичность.

2. Разработанная имитационная модель возникновения техногенной ситуации на основе логико-лингвистических переменных позволяет построить графические диаграммы (деревья рисков) причинно-следственных связей между входными параметрами и интегральным риском, тем самым реализовать функцию управления $R \sum$ на объектах АПК в реальных производственных условиях.

Предложена новая методология системного анализа безопасности электроустановок, в основе которой лежит изучение взаимосвязей компонентов модели (Ч-ЭУ-С) для идентификации уязвимых «звеньев» цепи, инициирующих события с целью обоснования превентивных мер предупреждения опасных происшествий. Для решения такой задачи предполагается использование новой технологии «мягких вычислений», позволяющей получить адекватное приближенное решение.

Список использованных источников:

1. Gabova M., Nikolsky O., Guner M. The expert system for assessing fire risks of electrical installations in the agrarian industrial complex based on neural networks // International Conference on High-Performance Computing Systems and Technologies in Scientific Research. - 2021. - Vol. 214. - No. 114. DOI: [10.1088/1742-6596/2142/1/012005](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2142/1/012005).

2. Udartseva O., Nikolsky O. Computer Science in Environmental Safety Research // International Science and Technology Conference on Earth Science. - 2019. - Vol. 414. - No. 459. DOI: [10.1088/1755-1315/459/4/042043](https://doi.org/10.1088/1755-1315/459/4/042043).

3. 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. - V. 113. - No. 124. DOI: [10.1088/1757-899X/941/1/012050](https://doi.org/10.1088/1757-899X/941/1/012050).

4. Halina T., Stalnaya M., Ivanov I., Rybalkina T., Ryazanova E. Speed Regulation of Single-Phase Engines Used in Agriculture // International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering. - 2018. - Vol. 223-227. - No. 6. DOI: [10.1109/APEIE.2018.8545140](https://doi.org/10.1109/APEIE.2018.8545140).

5. Дробязко О.Н., Куликова Л.В. Системно-вероятностное моделирование систем обеспечения электробезопасности на объектах АПК // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. - 2022. - № 2 (208). - С. 94–101.

6. Титов Е.В., Сошников А.А., Куликова Л.В. Оценка защитного действия многослойного экрана в электрическом поле широкого диапазона частот // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. - 2019. - № 9 (179). - С. 157–162.

7. 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 DOI: <https://doi.org/10.51419/202125538>.

8. Габова М.А. Оценка пожарных рисков электроустановок АПК на основе нейронных сетей // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. - 2021. - Т. 5. - № 1. - С. 217–221.

9. Никольский О.К. Модель функционирования системы техногенной безопасности электроустановок // Вестник АПК Ставрополя. - 2021. - № 1(41). - С. 19–23. DOI: [10/31279/2222-9345-2021-10-41-19-23](https://doi.org/10.31279/2222-9345-2021-10-41-19-23).

10. 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](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/5/052093).

11. Куликова Л.В. Энергетический анализ производства продукции растениеводства / Л.В. Куликова, Д.О. Суринский // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. - 2022. - № 4 (96). - С. 176–179.

12. Суринский Д.О., Карнаухов К.А. Методика расчета энергосберегающих мероприятий при защите объектов АПК от вредителей [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2022. – № 3. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/3/st_305.pdf DOI: <https://doi.org/10.51419/202123305>.

Цитирование:

Никольский О.К., Фараносов В.В., Суринский Д.О., Усков Е.В. Методы анализа безопасности электроустановок в человекомашинных системах [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2024. – № 1. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2024/1/st_104.pdf DOI: <https://doi.org/10.51419/202141104>.