

13. Крутов, А.В. Доочистка стоков постов мойки автотракторной техники применением метода электрофлокоагуляции / А.В. Крутов, М.А. Бойко, М.М. Суворов // Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 24-25 ноября 2011 г. / Белорус. гос. аграрн. техн. ун-т ; под ред. М.А. Прищепова. – Минск: БГАТУ, 2011. – С. 210- 213.

14. Salman, Hussein Abbas. Electrocoagulation Technique Used To Treat Wastewater: A Review / Hussein Abbas Salman // American Journal of Engineering Research (AJER). – 2018. – Vol. 7. – № 10. – P. 74-88.

15. Николаенок, М.М. О влиянии электрического тока на микроорганизмы в органических средах / М.М. Николаенок, П.В. Кардашов, Е.Е. Заяц // Агропанорама. – 1997. – № 4. – С.32-34.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 04.01.2024

УДК 658.345:681.3:621.315

<https://doi.org/10.56619/2078-7138-2024-161-1-33-38>

К ВОПРОСУ РАСПОЗНАВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПО НАВОДИМОМУ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМУ ПОЛЮ

В.В. Русских,

аспирант факультета «Технический сервис в АПК» БГАТУ

Г.И. Белохвостов,

доцент каф. управления охраной труда БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

В.Г. Андруш,

зав. каф. управления охраной труда БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

А.И. Зеленкевич,

зав. каф. электроснабжения и электротехники БГАТУ, канд. техн. наук

Статья посвящена решению актуальной научно-практической задачи – обеспечению электробезопасности при работе крупногабаритной сельскохозяйственной техники (КСХТ) под линиями электропередачи (ЛЭП) путем разработки устройства, сигнализирующего о приближении к ним. Представлена классификация устройств и способов определения приближения техники к ЛЭП. Предложен метод зеркальных проекций расчета напряженности электрических и магнитных полей, создаваемых ЛЭП. Произведен расчет тормозного пути комбайна и порога срабатывания разработанного сигнализатора. Приведены результаты расчета напряженностей электрического и магнитного поля ЛЭП напряжением 110кВ. Выполнен сравнительный анализ теоретических и полученных экспериментальных данных. Дана оценка соответствия расчетных данных экспериментальным.

Ключевые слова: сельское хозяйство, обнаружение линий электропередачи, крупногабаритная сельскохозяйственная техника, сигнализатор, электромагнитное поле.

The paper is devoted to the actual scientific and practical problem – electrical safety when operating large-sized agricultural machinery (LSAT) under electric power lines (EPL) by developing a device that signals an unsafe distance to the power line. A classification of devices and methods for detecting the proximity of machinery to power lines is presented. The method of mirror projections for calculating the intensity of electric and magnetic fields created by power lines is proposed. The calculation of the combine harvester braking distance and the threshold of the developed signalling device operation is made. The results of the calculations of electric and magnetic field strengths of 110 kV power line are given. A comparative analysis of theoretical and experimental data obtained by the authors is carried out. The conformity of the calculated data to the experimental ones is assessed.

Key words: agriculture, power line detection (PLD), large-sized agricultural machinery (LSAM), signaling device, electromagnetic field.

Введение

Предоставление прав и гарантий работникам сельскохозяйственного производства в сфере охраны труда, формирование условий для достойной трудовой деятельности, приносящей удовлетворение работнику и пользу окружающим, является одним из основных направлений социальной политики страны.

В начале XIX века были созданы первые рабочие прототипы тракторов, комбайнов и другой крупногабаритной сельскохозяйственной техники с целью повышения эффективности и снижения затрат ручного труда [1, 2]. Наряду с положительным эффектом это привело к повышению требований к квалификации работников и увеличению риска для здоровья и жизни людей.

Сельское хозяйство входит в число отраслей с вредными и опасными условиями труда. В своей трудовой деятельности операторы КСХТ подвергаются влиянию разного рода опасных производственных факторов, нередко приводящих к потере трудоспособности и гибели. По ходу движения техники возникают опасные зоны, границы которых определяются скоростью движения, габаритами и массой транспортного средства, временем реакции водителя, эффективностью тормозного устройства и коэффициентом сцепления шин с поверхностью дороги [3].

Наиболее сложными и ответственными этапами в производственном процессе работников агропромышленного комплекса являются посевные работы, заготовка кормов и уборка зерновых культур. Их организация и осуществление требуют от работодателей принятия хорошо обдуманных управленческих решений, нацеленных на получение максимального результата по производству сельскохозяйственной продукции [4, 5].

Машины и агрегаты, используемые для производства и послеуборочной обработки продукции растениеводства, должны быть технически исправны и отвечать требованиям безопасности при эксплуатации, а также полностью укомплектованными защитными ограждениями, устройствами сигнализации, отрегулированными агрегатами и механизмами, приборами, противопожарным инвентарем [6].

Одна из опасных ситуаций возникает при приближении поверхности машинно-тракторного агрегата (МТА) к проводу линии электропередачи, что может вызвать электротравму механизатора. Причинами травм в зоне ЛЭП при выполнении работ на МТА являются контакты с провисшими и оборванными проводами, либо приближение к ним на недопустимое расстояние [7].

К сожалению, в связи с низкой квалификацией или пренебрежением правилами охраны труда работниками, недостаточным контролем и управлением со стороны руководителей сельскохозяйственных организаций, несчастные случаи происходят ежегодно [8].

С развитием науки и техники были достигнуты определенные успехи в вопросе электробезопасности при работе техники в зоне ЛЭП, особенно это касается эксплуатации грузоподъемных механизмов, используемых в строительной отрасли (строительные краны), а также в железнодорожном транспорте. Главной причиной электротравматизма является невыполнение операций по проверке отсутствия напряжения в местах проводимых работ при помощи указателей напряжения. Ввиду отсутствия на сегодняшний день таких разработок и исследований в области сельского хозяйства, обеспечение электробезопасности при работе КСХТ под ЛЭП является актуальной проблемой, требующей решения задач более узкого круга и дополнительных исследований.

Вопросы расчета электрических и магнитных полей от ЛЭП описаны в трудах Жилейкина М.М., Рощина В.А., Парахина А.М., Долина П.А., Косарева И.А., Морозова А.С. и других ученых [9-12; 23].

Целью настоящей работы является обеспечение электробезопасности при работе крупногабаритной сельскохозяйственной техники под ЛЭП путем разработки устройства, сигнализирующего о приближении к ЛЭП.

Основная часть

Для предотвращения приближения КСХТ на недопустимое расстояние к ЛЭП используются различные устройства, способные их обнаруживать (рис 1).

Фотообрабатывающие дальномеры. 1. Анализ снимка с фотокамеры с использованием метрических и угловых размеров и алгоритма, позволяющего находить удаленность от одного объекта до другого.

Если объект имеет небольшие размеры или не обладает определенной формой, то для анализа создается модель движения объекта по нескольким кадрам, и расстояние до него определяется на основании метрического и углового смещения объекта. В результате имеется способ определения расстояния до удаленных



Рисунок 1. Классификация устройств, сигнализирующих приближение к ЛЭП

объектов с помощью видеокамеры, без предварительной калибровки ее местоположения [13].

2. *Анализ изображения в цветовых каналах и картинах глубины.* Специалистами Финансового университета при Правительстве Российской Федерации [14] был разработан алгоритм, который позволяет находить дальность от одного объекта до другого, анализируя изображение в цветовых каналах и картинах глубины. Первое изображение соответствует цветовому фрейму, т.е. является таким, каким его знает обычный обыватель, а на втором демонстрируются возможности современных камер, с получением снимка с картиной глубины.

3. *Метод сегментации изображений.* При помощи разработанного алгоритма происходит обработка изображения с камеры, в результате которой на изображении появляются границы всех объектов [15].

Ультразвуковые дальномеры. Принцип работы датчика схож с навигационной эхолокацией летучих мышей. Создаются обособленные звуковые импульсы ультразвукового диапазона, недоступные человеческому уху. Как только данный звук достигает ближайшей границы объекта, находящегося напротив, то он отражается от нее по принципу возникновения эхо. Затем датчик, принимающий отраженный сигнал, вычисляет расстояние до объекта, от которого произошло отражение. Однако в связи с малой площадью отражения проводов ЛЭП, этот способ предполагает значительные габариты антенны локатора, что не совсем приемлемо в нашем случае [16];

Лазерные дальномеры. Посредством лазерной триангуляции лазерный луч отражается от поверхности, на которую он направлен, и фиксируется линзой камеры. Мы временно отказались от этого метода, т.к. в данном случае необходимы: коллимированная среда с малой расходимостью и ручная наводка лазера на объект. Размеры проводов малы для замеров [17];

GPS системы. Работа подобных систем основывается на возможности получения данных о приближении к ЛЭП в местных отделениях электросетей или через глобальную навигационную спутниковую систему (ГНСС);

Сигнализаторы электромагнитного поля. Обнаружение ЛЭП происходит по наводимому электрическому и магнитному полю, с фиксированием некомпенсированной составляющей, которая используется для обнаружения ЛЭП. Подобный принцип применяется на небольших расстояниях, так как поля от различных проводов на большом расстоянии взаимно компенсируются, и используется в малогабаритных устройствах (например, в устройстве защиты строительного крана от опасного напряжения).

Использование сигнализаторов электромагнитного поля является, по мнению авторов, наиболее целесообразным для сельского хозяйства. При относительно небольших финансовых затратах он позволяет получить систему предупреждения о приближении к ЛЭП с удовлетворительными характеристиками.

Для достижения безопасного движения наземных транспортных средств под ЛЭП необходима их

идентификация на расстоянии, превышающем тормозной путь.

Согласно агротехническим требованиям, рекомендуемые рабочие скорости движения комбайнов находятся в следующих пределах [18, 19]:

- при уборке зерновых культур:
 - в валки – 6-8 км/ч;
 - при подборе валков – 4,5-8 км/ч;
 - при прямом комбайнировании – 3-8 км/ч;
- при уборке силосных культур – 5-12 км/ч;
- при уборке сахарной свеклы – 3-9 км/ч;
- при уборке картофеля – 1-5 км/ч.

Зная допустимую скорость, можно рассчитать тормозной путь комбайна (S_0), который при однократном нажатии на педаль рабочего тормоза и холодных тормозах должен быть не более, м

$$S_0 \leq 0,18 \cdot v_0 + v_0^2 / 90, \quad (1)$$

где v_0 – скорость в момент начала торможения, м/с [21];

0,18 (с) и $1/90$ (c^2/m) – корректирующие коэффициенты [21].

В случае нагрева тормозов до температуры, превышающей $100^\circ C$, расчетные значения S_0 следует увеличивать на 25 %.

Используя формулу (1) и рекомендации по выбору рабочей скорости комбайна [18-20], получим значение тормозного пути $S_0 = 2,15$ м (с учетом нагрева тормозов – 2,69 м).

Для определения эффективности обнаружения ЛЭП по наводимому электрическому полю разработанным авторами устройства [22] опытным путем было зафиксировано расстояние до ЛЭП (S), при котором прибор начинает срабатывать (порог срабатывания) – 11 м.

Проведем сравнение полученного значения S_0 и порога срабатывания прибора: $S/S_0 = 11/2,69 = 4,08$ раза.

Экспериментальными исследованиями установлено, что метод обнаружения ЛЭП по наводимому электрическому полю оказался наиболее оптимальным и доказал свою эффективность. Порог срабатывания разработанного сигнализатора был выше, чем тормозной путь комбайна, в 4,08 раза, что позволяет своевременно предупредить оператора крупногабаритной техники о приближении к ЛЭП, обеспечив тем самым его защиту от поражения электрическим током.

Для определения сходимости теоретических и практических данных необходимо произвести расчет напряженности электрического и магнитного полей по параметрам ЛЭП, провести измерительные работы для получения действительных значений напряженности, сравнить расчетные и действительные значения с предельно допустимыми (установленными санитарными нормами и правилами ТКП). Было принято, что грозозащитный трос изолирован от опоры, т.е. не оказывает существенного влияния на электрическое поле проводов.

Согласно собранной статистике электротравматизма [8], наибольшее количество несчастных случаев зафиксировано под ЛЭП напряжением 110 кВ и 10 кВ.

Для расчета использовался метод зеркальных проекций (рис. 2) [11;23]. Напряженность поля рассчитывалась для ЛЭП напряжением 110кВ, на уровне двух метров от поверхности земли.

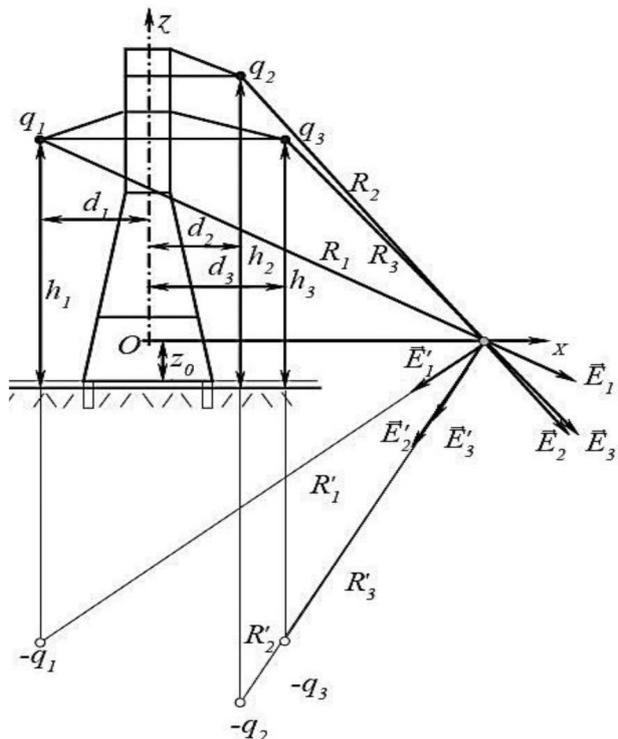


Рисунок 2. К расчету напряженности электрического и магнитного поля вблизи воздушной линии электропередачи: z_0 – высота точки наблюдения, м; h_1, h_2, h_3 – высота размещения проводов ЛЭП над поверхностью земли, м; R_1, R_2, R_3 – кратчайшие расстояния от провода до точки, в которой определяется напряженность, м; R'_1, R'_2, R'_3 – зеркальные отображения кратчайших расстояний от провода до точки, в которой определяется напряженность, м; d_1, d_2, d_3 – расстояния между осями соседних проводов линии, м; q_1, q_2, q_3 – заряды проводов, В/м; E_1, E_2, E_3 – напряженности электрических полей, проводов над поверхностью земли, В/м; E'_1, E'_2, E'_3 – напряженности вторичных полей, проводов над поверхностью земли, В/м

Согласно методике расчета, имеем следующие данные:

– для электрического поля:

$$|\vec{E}_i + \vec{E}'_i| = \frac{U_\phi l \cdot e^{j(i-1)\Delta}}{4 \ln \frac{2h_i}{a}} \sqrt{\frac{1}{R_i^4} + \frac{1}{R_i'^4} - \frac{1}{R_i^2 (R_i')^2}}, \quad (2)$$

где \vec{E}_i – напряженность электрического поля, i -го провода над поверхностью земли, В/м;

\vec{E}'_i – напряженность вторичного поля, i -го провода над поверхностью земли, В/м;

U_ϕ – класс напряжения ЛЭП, В;

l – длина анализируемого участка ЛЭП, м;

j – мнимая единица;

$\Delta = 120^\circ$ – фазовый сдвиг;

h_i – высота размещения i -го провода над поверхностью земли, м;

a – шаг расщепления проводов, м;

R_i – кратчайшее расстояние от i -го провода до точки, в которой определяется напряженность, м;

R'_i – зеркальное отображение кратчайшего расстояния i -го провода до точки, в которой определяется напряженность, м;

– для магнитного поля:

$$|\vec{H}_i + \vec{H}'_i| = \frac{I \cdot e^{j(i-1)\Delta}}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{R_i^2} + \frac{1}{(R'_i)^2} - \frac{1}{R_i^2 (R'_i)^2} \cos \psi}, \quad (3)$$

где \vec{H}_i – напряженность магнитного поля, i -го провода над поверхностью земли, А/м;

\vec{H}'_i – напряженность вторичного поля, i -го провода над поверхностью земли, А/м;

I – ток в i -м проводе;

ψ – угол, образованный векторами \vec{H}_i и \vec{H}'_i , град.

По полученным данным построены графики (рис. 3, 4).

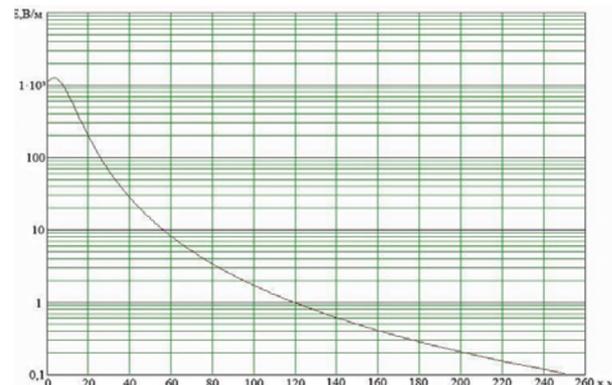


Рисунок 3. Распределение напряженности электрического поля ЛЭП в поперечном направлении к оси ЛЭП

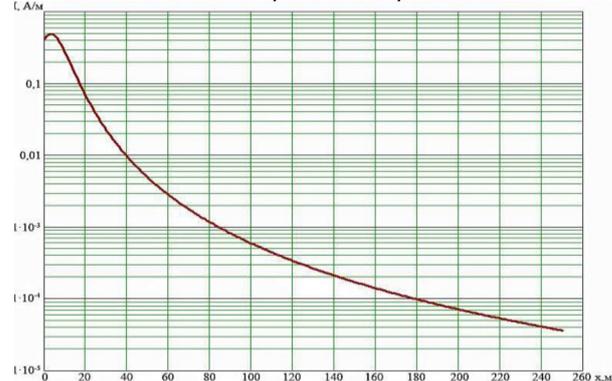


Рисунок 4. Распределение напряженности магнитного поля ЛЭП в поперечном направлении к оси ЛЭП

Для экспериментального определения напряженности электрического и магнитного поля ЛЭП использовался сертифицированный в Республике Беларусь измеритель напряженности электрических и магнитных полей ПЗ –80 (рис. 5).



Рисунок 5. Измеритель напряженности электрических и магнитных полей ПЗ-80

Для измерений была выбрана ЛЭП «Северная – Восточная» напряжением 110 кВ. Высота замера составляла 2 м.

На основании результатов замеров напряженности электрического и магнитного полей с использованием прибора ПЗ-80 построены графики распределения напряженности электрического и магнитного поля ЛЭП в поперечном направлении к оси ЛЭП (рис. 6, 7).

Анализ расчетных данных распределения напряженности электрического и магнитного полей ЛЭП напряжением 110 кВ в поперечном направлении к оси ЛЭП (рис. 4, 5) и данных, полученных экспериментальным путем (рис. 6, 7), показал высокую степень их соответствия.

Заключение

Выполнен анализ способов обнаружения ЛЭП и обоснован выбор для дальнейших исследований использования в крупногабаритной сельскохозяйственной технике способа обнаружения по электрическому полю.

Это в первую очередь связано с возможностью его использования на небольших расстояниях, т.к. поля от различных проводов на большом расстоянии

взаимно компенсируются.

По результатам проведенного эксперимента с применением прибора ПЗ-80 сделан вывод о нелинейности полученных зависимостей. Картина распределения напряженности электромагнитного поля показывает, что с увеличением расстояния от проводов ЛЭП, его величина убывает. При измерениях магнитного поля наблюдается разброс показаний прибора, влияние на которые оказывают условия измерения и техногенная обстановка окружающей среды.

Полученные экспериментальные данные с учетом аппроксимации имеют достаточную сходимость с теоретическими, но для уточнения влияния помех от работы техники и получения большего массива экспериментальных данных необходимо провести серию опытов в полевых условиях при работающей КСХТ.

Предложено устройство, сигнализирующее о небезопасном расстоянии до ЛЭП, порог срабатывания которого превышает наименьшее расстояние торможения комбайна в 4 раза.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Самый первый трактор в мире. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tractor-server.ru/samyj-pervyj-traktor-v-mire>. – Дата доступа: 20.12.2023.
2. Из истории развития зерноуборочной техники в XXI – первой половине XX века. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/iz-istorii-razvitiya-zernouborochnoy-tehniki-v-xix-pervoy-polovine-hh-veka>. – Дата доступа: 20.12.2023.
3. Система стандартов безопасности труда. Техника сельскохозяйственная. Методы оценки безопасности: ГОСТ 12.2.002-91. – Взамен ГОСТ 12.2.002-81; введ. 1992.07.01. – Минск: Госстандарт, 2011. – 56 с.
4. Ермак, И.Т. Проблемы охраны труда в сельском хозяйстве и возможные пути их решения / И.Т. Ермак, А.К. Гармаза, С.В. Киселев // Переработ-

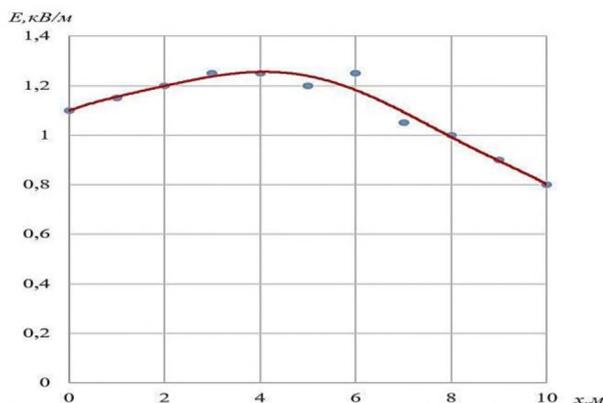


Рисунок 6. Экспериментальные данные распределения напряженности электрического поля ЛЭП в поперечном направлении к оси ЛЭП

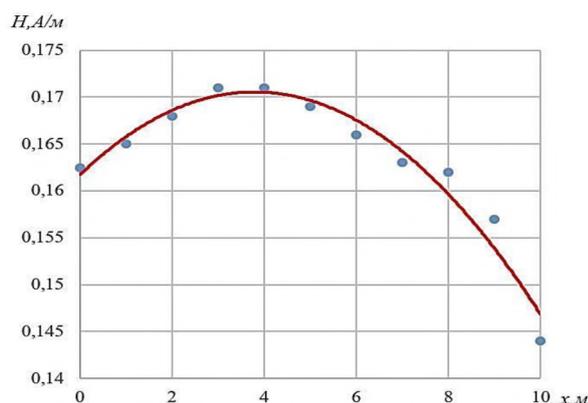


Рисунок 7. Экспериментальные данные распределения напряженности магнитного поля ЛЭП в поперечном направлении к оси ЛЭП

ка и управление качеством сельскохозяйственной продукции: сборник статей V Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 25-26 марта 2021 г./ Белорус. гос. аграр. техн. ун-т. – Минск: БГАТУ, 2021 – С. 153-155.

5. Проектирование воздушных и кабельных линий напряжением до 220 кВ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tiberti.kz/services/proektirovanie/proektirovanie-vozdushnykh-i-kabelnykh-linij-napryazheniem-do-220kv/>. – Дата доступа: 20.12.2023.

6. Система стандартов безопасности труда. Тракторы и машины самоходные сельскохозяйственные. Общие требования безопасности: ГОСТ 12.2.019-2015. – Взамен ГОСТ 12.2.019-2005; введ. 2017.11.01. – Минск: Госстандарт, 2017. – 20 с.

7. Машины сельскохозяйственные. Требования безопасности: ГОСТ ISO 4254-1-2015. – Ч. 1. Общие требования; введ. 2021.12.15.

8. Русских, В.В. Об актуальности оснащения крупногабаритной сельскохозяйственной техники устройствами сигнализации о приближении к воздушным линиям электропередач / В.В. Русских // Техника и технология пищевых производств: материалы XV Юбилейной Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19-20 апреля 2023 г.: в 2 т./ Белорус. гос. ун-т пищевых и химических технологий. – Могилев: БГУТ, 2023. – Т. 2. – С. 320-321.

9. Косарев, И.А. Многофакторная оценка условий электробезопасности при выполнении путевых работ на электрифицированных железных дорогах: дис. ... канд. тех. наук: 05.26.01 / И. А. Косарев. – М., 2016. – 158 с.

10. Морозов, А.С. Повышение электробезопасности при эксплуатации воздушных линий электропередачи напряжением 10 кВ путем разработки и внедрения средств бесконтактного контроля наличия напряжения на проводах: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.26.01 / А.С. Морозов; Национальный исследовательский ун-т «МЭИ». – М., 2005. – 20 с.

11. Долин, П.А. Основы техники безопасности в электроустановках: учеб. пособие для вузов / П.А. Долин. – 3-е издание, перераб. и доп. – М.: «Знак», 2000. – 440 с.

12. Игаева, М. Л. Обнаружение воздушных линий электропередач по наведенному электрическому полю / М.Л. Игаева, А.В. Хабаров // Датчики и системы. – 2009. – № 4. – С. 35-37.

13. Измеритель дальности и размерных параметров объектов на основе цифровой фотокамеры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/5009/1/09%D0%9A%D0%BE%D0%B7%D0%BB%D0%BE%D0%B2.pdf>. – Дата доступа: 20.12.2023.

14. Определение расстояния до объекта в зоне движения автомобиля, используя анализ видеоданных [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1511/1511.07963.pdf>. – Дата доступа: 20.12.2023.

15. Способ определения расстояния до объекта при помощи камеры (варианты): патент № 2014137990/28; RU2602729C2 / И.С. Шишалов, Н.В. Погорский, А.В. Филимонов, О.А. Громазин.

16. Ультразвуковой дальномер [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://yandex.ru/patents/doc/RU189788U120190604> – Дата доступа: 20.12.2023.

17. Русских, В.В. Классификация устройств-дальномеров, сообщаящих расстояние до линий электропередач / В.В. Русских, Г.И. Белохвостов // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства: сборник науч. трудов. – Горки: БГСХА, 2023. – Вып. 8. – С. 138-141.

18. Технологии и техническое обеспечение производства: учеб. пособие / Т.А. Непарко, А.В. Новиков, И.Н. Шило; под общ. ред. Т.А. Непарко. – Минск: ИВЦ Минфина, 2015. – 199 с.

19. Национальный Интернет-портал Республики Беларусь [Электронный ресурс] / Нац. Центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Режим доступа: <https://belagromech.by/rekomendacii-rekomendacii-po-podgotovke-zernouborochnoj-tehniki-i-zernosushilnogo-hozjajstva-k-uborke-urozhaja>. – Дата доступа: 20.12.2023.

20. Регулировки зерноуборочного комбайна [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.arsagro.ru/regulirovki-zernouborochnogo-kombajna>. – Дата доступа: 20.12.2023.

21. Андруш, В.Г. Производственная безопасность в АПК. Лабораторный практикум: учеб. пособие / В.Г. Андруш, Т.П. Кот, О.В. Абметко. – Минск: БГАТУ, 2019. – 308 с.

22. Русских, В.В. К вопросу разработки устройства для сигнализации приближения к воздушным линиям электропередач / В.В. Русских [и др.] // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции: сборник статей VI Междунар. науч.-практич. конф., Минск, 30-31 марта 2023 г.; ред.: В.Я. Груданов [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2023. – С. 303-305.

23. Дровбыш, В.Н. Экологический мониторинг состава почвы в зоне размещения высоковольтной ЛЭП / В.Н. Дровбыш, М.Ю. Маслов О.Ю. Сарокваша // Вестник Самарского гос. ун-та. Естественнонаучная серия. – 2006. – № 4. – С. 172-182.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 12.01.2024