ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 631.3:631.171:634:632.51
https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-103-114

Агробиоэлектротехнология борьбы с нежелательной и сорной растительностью в садах и виноградниках: обоснование и принципы технической реализации

***И.В. Юдаев*[1]✉, *Ю.В. Даус*[2], *И.В. Шаров*[3], *Е.А. Рожков*[4], *Е.Е. Рудь*[5]**

[1, 2, 3, 4, 5] Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина; г. Краснодар, Россия

[1] etsh1965@mail.ru✉; https://orcid.org/0000-0002-3435-4873

[2] zirochka3011@gmail.com; https://orcid.org/0000-0001-9120-7637

[3] ivanshar98@gmail.com

[4] zhenyacool31@yandex.ru; https://orcid.org/0009-0003-8607-0252

[5] eugene.rud@yandex.ru; https://orcid.org/0009-0000-9779-5564

Аннотация. Реализация принципов органического сельского хозяйства в виноградарстве и садоводстве требует поиска новых технологически обоснованных и экологически безопасных операций. В качестве альтернативы традиционно используемым способам борьбы с нежелательной растительностью – механическому и химическому – целесообразно применять агробиоэлектротехнологию. Исследования проведены с целью определения параметров режима воздействия на сорную растительность, необратимо повреждающего их ткани, и обоснования конструкции мобильного малогабаритного электротехнологического устройства для борьбы с сорняками в садах, питомниках и виноградниках. В ходе многолетних лабораторных и полевых исследований изучили электропроводные свойства растительной ткани разных видов сорняков и сопротивление цепей протекания тока обработки, чувствительность растительной ткани сорняков к электроимпульсному необратимому повреждению. Для оценки необратимого повреждения внутриклеточных компонентов ткани сорняков исследовали степень повреждения растительной ткани. Воздействие на сорняки осуществляли электрическими импульсами высокого напряжения амплитудой 10…15 кВ, длительностью 20-60 мкс и частотой 1…5 Гц. Энергия одного импульса составляла 1,5…2,0 Дж. Установлено, что предельная доза электрической энергии импульсного воздействия для необратимого повреждения внутриклеточных компонентов однолетних и многолетних сорняков находится в пределах 110…740 Дж. Несмотря на необратимое повреждение растительной ткани сорняков электроимпульсная обработка сохраняет полезную почвенную фауну и местообитание полезных микробов. Для реализации агробиоэлектротехнологии предложен малогабаритный передвижной агрегат на основе мотоблока, в прицепном модуле которого размещается электротехническая часть установки, а на раме смонтирована электродная система с двумя типами электродов. В целях повышения агротехнологической эффективности и согласованной работы с минитрактором планируется дальнейшая модернизация представленной конструкции.

Ключевые слова: агробиоэлектротехнология; виноградник; сад; электроимпульсная обработка; электроимпульс; сорняк; степень повреждения растительной ткани

Финансирование. Исследования выполнены в рамках научного проекта РНФ № 25-29-01005 «Электроимпульсная, энергомалозатратная, экологически чистая агробиоэлектротехнология борьбы с сорной и нежелательной растительностью для систем ведения органического садоводства и виноградарства». https://rscf.ru/project/25-29-01005/.

Для цитирования: Юдаев И.В., Даус Ю.В., Шаров И.В., Рожков Е.А., Рудь Е.Е. Агробиоэлектротехнология борьбы с нежелательной и сорной растительностью в садах и виноградниках: обоснование и принципы технической реализации // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 5. С. 103-114. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-103-114

© Юдаев И.В., Даус Ю.В., Шаров И.В., Рожков Е.А., Рудь Е.Е., 2026

ORIGINAL ARTICLE

Agrobioelectrotechnology for weed control in orchards and vineyards: rationale and principles of technical implementation

***I.V. Yudaev*[1]✉, *Y.V. Daus*[2], *I.V. Sharov*[3], *E.A. Rozhkov*[4], *E.E. Rud*[5]**

[1, 2, 3, 4, 5] Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin; Krasnodar, Russia

[1] etsh1965@mail.ru✉; https://orcid.org/0000-0002-3435-4873

[2] zirochka3011@gmail.com; https://orcid.org/0000-0001-9120-7637

[3] ivanshar98@gmail.com

[4] zhenyacool31@yandex.ru; https://orcid.org/0009-0003-8607-0252

[5] eugene.rud@yandex.ru; https://orcid.org/0009-0000-9779-5564

Abstract. The integration of organic farming principles into viticulture and horticulture demands novel, technologically viable, and environmentally safe practices. Agrobioelectrotechnology offers a promising alternative to traditional mechanical and chemical weed control. The study aims to determine the electrical parameters required to cause irreversible tissue damage in weeds and to justify the design of a compact, mobile electrotechnological device for weed control in orchards, nurseries, and vineyards. Long-term laboratory and field investigations analyzed the electrical conductivity of various weed species, circuit resistance during treatment current flow, and the sensitivity of weed tissues to irreversible electro-pulse damage. To evaluate cellular-level impact, the degree of intracellular and tissue damage was assessed. Weeds were subjected to high-voltage electric pulses (amplitude: 10-15 kV; duration: 20-60 μs; frequency: 1-5 Hz) with a single-pulse energy of 1.5-2.0 J. The threshold electrical energy dose required to cause irreversible intracellular damage in annual and perennial weeds ranged from 110 to 740 J. Notably, while effectively destroying weed tissues, electro-pulse treatment preserves beneficial soil fauna and microbial habitats. To implement this technology, the authors propose a compact mobile unit based on a walk-behind tractor. The unit's trailer module houses the electrical components, while a dual-type electrode system is mounted on the frame. Further design optimization is necessary to enhance agronomic efficiency and ensure seamless integration with mini-tractors.

Keywords: agrobiobioelectrotechnology; vineyard; orchard; electric-pulse treatment; electric pulse; weed; degree of plant tissue damage

Funding. The research was supported by the Russian Science Foundation (RSF), Project No. 25-29-01005, titled "Electric-pulse, low-energy, environmentally friendly agrobioelectrotechnology for weed and unwanted vegetation control for organic gardening and viticulture systems" (https://rscf.ru/project/25-29-01005/).

For citation: Yudaev I.V., Daus Y.V., Sharov I.V., Rozhkov E.A., Rud E.E. Agrobioelectrotechnology for weed control in orchards and vineyards: rationale and principles of technical implementation. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2026;28(5):103-114. (In Russ.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-103-114

Введение

Садоводство и виноградарство развиваются в России активно. Реализация комплекса агротехнологических операций по уходу за почвенным покровом в органическом плодоводстве и виноградарстве с применением принципов регенеративного сельского хозяйства выявила необходимость поиска технологически эффективных и экологически безопасных способов борьбы с трудноискоренимыми многолетними и инвазивными сорными растениями [1, 2].

Существующие методы борьбы с сорняками – например, применение химически синтезированных ядохимикатов и механическое удаление сорняков, зачастую оказываются малоэффективными, трудоемкими, требуют многократных повторных обработок и оказывают негативное антропогенное воздействие на окружающую среду. Так, гербицид сплошного действия с основным действующим веществом глифосатом представляет потенциальный риск для здоровья человека, токсично воздействует на микрофлору почвы, снижает плодородие почвы и др. В связи с этим H.J. Beckie и др. [3] отмечают необходимость ограничения использования химически небезопасных ядохимикатов в пользу альтернативных и безвредных технологий.

Альтернативные методы – такие, как огневая, паровая или нетрадиционная механическая обработка (например, вычесывающими щетками), далеки от оптимальной замены ими применения гербицидов ввиду высокой стоимости их реализации и отсутствия системности в решении проблемы эффективного уничтожения сорняков и очагов их

распространения. По оценке G.R.Y. Coleman и др. [4], энергозатраты на обработку огнем и инфракрасное облучение сорных трав достигают, соответственно, 1008…4334 и 2000…3887 МДж/га. При использовании бороны с гибкими зубьями расходуется от 4,2 до 5,5 МДж/га, при эксплуатации культиватора – от 13 до 14 МДж/га, роторной мотыги – от 12 до 17 МДж/га. Энергозатраты традиционной химической прополки составляют 15 МДж/га.

Согласно оценке D.J. Bloomer и др. [5] альтернативная электротехнологическая обработка почвы отличается низкими затратами совокупной энергии. По заявлению R.G. Wilson [6] и M.F. Diprose [7] электрофизическое воздействие представляет собой единственную нехимическую альтернативу, оказывающую системное действие и, как отмечает M.J. Slaven [8], сопоставимую по технологической эффективности с применением гербицидов. Электропрополка реализуется за счет протекания повреждающей плотности тока по тканям растений при их контакте с электродами электротехнологической установки [9, 10]. При этом возникают необратимые нарушения нормального функционирования внутриклеточных структур, приводящие к гибели растения [11], а в отдельных случаях – к максимальному подавлению роста и развитию сорных трав [12]. Затраты совокупной энергии на электропрополку составляют от 15 до 19 МДж/га, в случае альтернативного варианта лазерной прополки – от 15 до 249 МДж/га [4, 9].

За рубежом электротехнологические установки применяются для борьбы с нежелательными растениями на территориях со сплошной засоренностью почвенных площадей [5, 7], в междурядьях посевов сельскохозяйственных культур [6, 7], в садах и виноградниках [13, 14], а также на плантациях [15], по обочинам дорог и тротуаров, по мощенным камнем и тротуарной плиткой площадям и др. [10]. Так, установка XPS Zasso (рис. 1а, б) (табл.) осуществляет прополку в междурядьях и вокруг ствола плодовых



а б в г д е

Рис. 1. Электротехнологические установки для борьбы с сорняками:
прополочная XPS[1] Zasso (а, б); специализированная RootWave eWeeder[2] (в, г); малогабаритная ZAP Weeder[3] (д, е)

Fig. 1. Electrotechnological weed control units:
XPS Zasso weeding[1] unit (a, b); specialized RootWave eWeeder[2] (c, d); compact ZAP Weeder[3] (e, f)

[1] https://www.agrosklad.com.pl/agxtend-xpower/.
[2] https://rootwave.com/.
[3] https://zasso.com/portfolio/zap_weeder/.

Таблица

Основные характеристики выпускаемых электротехнологических машин и установок для борьбы с нежелательной растительностью в садах и на виноградниках

Table

Main specifications of commercially available electrotechnological machines and units for weed and unwanted vegetation control in orchards and vineyards

Марка установки (компания, страна-производитель)	Основные характеристики
XPS Zasso (Zasso, Швейцария-Бразилия)	Мощность движителя (колесного трактора) – 75 л.с. Рабочая скорость – до 4 км/ч Наличие сочленения вала генератора с ВОМ трактора Мощность генератора – 24 или 36 кВт Напряжение питания – трехфазное промышленной частоты Напряжение обработки – от 5 до 12 кВ Масса установки – 1200 кг Электродная система: – полная ширина захвата – 1,8…4,0 м – рабочая ширина охвата электродов с обеих сторон – 500 мм (250 мм – статическая, 300 мм – качающаяся) Эффективность: на 84…87% снижение биомассы сорняков Наличие сертификата CE о соответствии стандартам безопасности
eWeeder (RootWave, Великобритания)	Мощность движителя (колесного трактора) – 120 л.с. Рабочая скорость – до 5 км/ч Наличие сочленения вала генератора с ВОМ трактора Мощность генератора – 60 кВт Напряжение питания – переменное трехфазное 415 В промышленной частоты, преобразованное в высокочастотное 18 кГц Напряжение обработки – от 5 до 15 кВ Масса установки – 1500 кг Электродная система: – ширина захвата – от 2,0 до 6,0 м – рабочая ширина охвата с каждой стороны – от 0,3 м до 0,65 м Эффективность: уничтожение сорняков до 99% Высокая частота тока обработки (18 кГц) повышает электробезопасность установки
ZAP Weeder (Zasso, Швейцария-Бразилия)	Аккумуляторное питание – 2 литий-ионных аккумулятора, прополка возможна в течение 3-4 ч на одной зарядке Рабочая скорость – 1,5-3 км/ч Аккумуляторная батарея Pellenc ULIB1500: – емкость – 34,5 А · ч – напряжение – 43,6 В – время зарядки – 5 ч (90%) с ускоренной зарядкой на токе 7,6 А Мощность (максимальная) силовых модулей – 2 кВт Напряжение на электродной системе – 10 кВ Ток обработки – от 0 до 2 А Масса установки (без аккумуляторных батарей) – 69 кг Электродная система: – гибкие потенциальные и заземленные электроды из нержавеющей стали – рабочая ширина захвата – 60 см – наличие бокового смещения системы до 5 см Размеры (в сложенном виде, с батареями): 67 × 119 × 86 см Установка обеспечена средствами повышенной электробезопасности

деревьев и виноградной лозы неподвижными и подвижными электродами, подводя электричество непосредственно к сорнякам, тем самым необратимо повреждая внутренние структуры их тканей. Апробация XPS Zasso показала, что ее применение сопоставимо с использованием гербицидов типа глифосата (*Crucial*®) и амитрола с тиоцианатом аммония (*Amitrole T*) и дает больший эффект в сравнении со скашиванием, имитирующим выпас скота [8]. Другая электрическая машина eWeeder (рис. 1в, г) (табл.), используя систему электродов – аппликаторов на гидравлических манипуляторах – беспрепятственно работает в садах, виноградниках и на фруктовых плантациях с различной шириной рядов, создавая свободную от сорняков и травы полосу шириной 30…50 см. Применение такой установки обходится дешевле по сравнению с механической и химической прополкой. Уничтожение сорняков на высоких частотах позволяет снизить вероятность возникновения остановки сердца при неконтролируемом

попадании человека или некрупного животного в цепь протекания тока в 10000 раз по сравнению с частотой 50 Гц, в 2500 раз – по сравнению с постоянным током [8]. На небольших почвенных участках, труднодоступных для работы традиционной техники, например, на небольших фруктовых плантациях, садах и виноградниках, для борьбы с сорной и нежелательной растительностью используют малогабаритный мобильный электропрополочник ZAP Weeder (рис. 1д, е) (табл.) [13].

В России отсутствуют установки для электрической борьбы с нежелательной растительностью в садах, виноградниках и для сплошной прополки сельскохозяйственных угодий, в то время как еще в 90-е гг. прошлого столетия А.В. Тверитин и др[4]. описали и дали подробную оценку проведенным в стране исследованиям, а А.А. Спирин, ученые ЧГАУ и В.Н. Топорков[5] разработали опытные установки для электропрополки паров, посевов и посадок культурных растений.

Разработка современной установки для органического земледелия, изготовленной из отечественных комплектующих элементов и узлов, удовлетворяющих потребности отечественного рынка, обусловливает необходимость выявления условий эффективной электроимпульсной прополки, поиска вариантов контакта электродной системы с растениями и эффективного режима воздействия электрической энергии на растительную ткань сорняков, проведения исследований электропроводных свойств объектов обработки, установления летальных доз повреждения сорняков.

Цель исследований: экспериментально определить параметры режима необратимого повреждения внутриклеточных компонентов тканей сорняков и обосновать конструкцию мобильного малогабаритного электротехнологического устройства для борьбы с сорняками в садах, питомниках и виноградниках.

Материалы и методы

В плодовых садах и виноградниках ЮФО и СКФО представлены в основном следующие виды сорной растительности: амброзия полынолистная (*Ambrosia artemisiifolia L.*), марь белая (*Chenopodium album L.*), молочай лозный (*Euphorbia virgata L.*), осот полевой (*Sonchus arvensis L.*), осот розовый (*Cirsium arvense L.*), пырей ползучий (*Elytrigia repens L.*), щирица запрокинутая (*Amaranthus retroflexus L.*). Их доля в общем засорении почвенных площадей достигает 80…90%.

Применимость агробиоэлектротехнологии в борьбе с нежелательной и сорной растительностью исследовали в лабораторных и полевых условиях в периоды 1998-2012 гг. и с 2021 г. по настоящее время с использованием общих и частных методик проведения экспериментов. Основывались на результатах исследований по выявлению наиболее эффективного вида повреждающего электрического воздействия [16], летальных доз электроимпульсной обработки [17], электропроводных свойств растительных тканей сорняков [18], основных факторов электроимпульсного воздействия, повреждающих внутриклеточные структуры растительной ткани [19], отклика почвенной биоты на электроимпульсную обработку[6].

Электропроводные свойства растительной ткани сорняков и сопротивление цепей протекания тока обработки исследовали на измерительных комплексах, включающих в себя генератор звуковых сигналов, цифровые мультиметры, стрелочные приборы и авторский измерительный мост сравнения для фиксации полного сопротивления растительной ткани или его активной составляющей.

Чувствительность растительной ткани сорняков к электроимпульсному необратимому повреждению изучали на лабораторном комплексе (рис. 2а). Установка включает в себя регулируемый источник высокого постоянного напряжения, генератор импульсов высокого напряжения, схему формирования сигналов управления для разрядника, систему контроля за параметрами обработки и их фиксации.

Определение повреждающих доз электроимпульсного воздействия осуществляли в полевых условиях с помощью передвижного высоковольтного комплекса (рис. 2б), работающего от инверторного бензинового генератора. С выхода разрядного блока генератора импульсного напряжения напряжение обработки подводилось к обрабатываемым сорнякам при помощи навесной или выносной системы электродов. Сопротивление цепей протекания тока обработки фиксировали электронным омметром, цифровым RLC-метром, портативным осциллографом.

Воздействие на растения осуществляли электрическими импульсами высокого напряжения

[4] Тверитин А.В., Трофимова Н.Б. Уничтожение сорняков током высокого напряжения // Электронная обработка материалов. 1986. № 3. С. 52-56.

[5] Топорков В.Н., Королев В.А. Электроимпульсная установка для борьбы с сорняками. М.: ФНАЦ ВИМ, 2017. 132 с.

[6] Юдаев И.В., Бренина Т.П., Прокофьев П.В. Влияние процесса электроимпульсной прополки на почвенную микрофлору и микроорганизмы // Экологические и экономические составляющие устойчивого развития региона: Материалы круглого стола, г. Волгоград, 27 марта 2008 г. Волгоград: Волгоградский государственный университет, 2008. С. 181-186. EDN: NQFFAE.



а б

Рис. 2. Фотографии комплексов для изучения параметров и режима электроимпульсной обработки нежелательных трав:
а – стационарный: 1 – блок подключения к сетевому напряжению с аппаратами коммутации и защиты; 2 – блок управления аппаратом СКАТ-70; 3 – высоковольтный блок аппарата СКАТ-70; 4 – блок формирования высоковольтных импульсов и задатчик частоты их следования; 5 – платформа для фиксации образцов; 6 – делитель напряжения для измерения высокого напряжения; 7 – киловольтметр СКВ; **б** – передвижной: 1 – регулятор сетевого напряжения; 2 – повысительный трансформатор; 3 – блок выпрямления переменного напряжения; 4 – блок формирования высоковольтных импульсов и задатчик частоты их следования; 5 – воздушный трехполюсный переключатель; 6 – арматура для крепления навесных электродов

Fig. 2. Experimental units for investigating the parameters and modes of electric-pulse treatment of unwanted vegetation (photos):
a – stationary unit: 1 – grid voltage connection unit with switching and protection devices, 2 –SKAT-70 control unit, 3 – SKAT-70 high-voltage unit, 4 – high-voltage pulse generation unit and pulse repetition rate controller, 5 – sample fixing platform, 6 – high-voltage divider, 7 – SKV kilovoltmeter; **b** –mobile unit: 1 – line voltage regulator, 2 – step-up transformer, 3 – AC-to-DC rectification unit, 4 – high-voltage pulse generation unit and pulse repetition rate controller, 5 – three-pole air switch, 6 – mounting hardware for attached electrodes

амплитудой 10…15 кВ, длительностью 20-60 мкс и частотой 1…5 Гц. Энергия одного импульса составляла 1,5…2,0 Дж.

Для обеспечения безопасного проведения лабораторных и полевых исследований разработаны и утверждены мероприятия по электробезопасности.

Результаты и их обсуждение

В основе технологии электроимпульсного необратимого повреждения клеточных структур реализуется явление электропорации биологических клеток, подразумевающее протекание повреждающего импульса тока высокого напряжения. Для теоретического описания необратимого повреждения внутриклеточных компонентов ткани сорняков в качестве аргумента логистической функции целесообразно использовать удельную энергию, поглощенную этой тканью, поскольку именно она определяет суммарный эффект от воздействия электрического поля во времени. Доля необратимо поврежденных клеток (степень повреждения), определяемая отношением сопротивления обрабатываемой ткани в процессе обработки к сопротивлению этой же ткани до обработки $S(W_{уд})$, о.е., и количественно равной значению от 1,0 и выше, может быть представлена выражением:

$$S(W_{уд}) = \frac{1}{1 + e^{-K_W \cdot (W_{уд} - W_{уд.пор})}}, \quad (1)$$

где $S(W_{уд})$ – степень повреждения растительной ткани, о.е.; $W_{уд}$ – удельная энергия, подведенная (или поглощенная) к единице объема растительной ткани, Дж/см^3; $W_{уд.пор}$ – пороговое значение удельной электрической энергии или полулетальная удельная энергия, при которой необратимо повреждается 50% внутриклеточных компонентов и до достижения которой ткань может гарантированно восстановиться, Дж/см^3; K_W – коэффициент крутизны сигмоидальной зависимости (S-образной кривой), характеризующий степень гетерогенности ткани по чувствительности к энергии обработки или чувствительности растительной ткани к электрическому воздействию, см^3/Дж.

При поглощении растительной тканью удельной электрической энергии в количестве $W_{уд} \geq W_{уд.пор}$ в ее внутренних структурах начинаются процессы

необратимой электропорации. При этом количество необратимо поврежденных внутриклеточных компонентов резко увеличивается, и растение гибнет. Если повреждающий ток протекает через корневую часть растения, то необратимо повреждается и она, что позволяет однозначно зафиксировать гибель сорняка.

Применимость электрических импульсов высокого напряжения микросекундной длительности для необратимого повреждения внутриклеточных компонентов растительной ткани сорных трав подтверждена результатами многолетних исследований.

Многолетними лабораторными исследованиями выявлены значения удельных затрат электрической энергии, способной необратимо повреждать ткани надземной и корневой систем сорных трав в разные периоды их физиологического развития: от фаз бутонизации и цветения до фаз плодоношения и созревания [17]:

молочай лозный (*Euphorbia waldsteinii L.*) – 4,9…24,7 и 5,1…15,2 Дж/см^3;

щирица запрокинутая (*Amaranthus retroflexus L.*) – 3,4…8,2 и 3,9…7,8 Дж/см^3;

осот розовый (*Cirsium arvense L.*) – 2,4…8,1 и 2,9…14,3 Дж/см^3;

осот полевой (*Sonchus arvensis L.*) – 3,3…15,2 и 4,1…16,4 Дж/см^3;

молокан татарский (*Lactuca tatarica L.*) – 3,8…6,8 и 2,6…8,7 Дж/см^3.

Степень повреждения растительной ткани возрастает с повышением напряженности электрического поля в ней и достигает предельного значения при 3,5…3,85 кВ/см. Поэтому для надежного повреждения перечисленных сорняков необходимо в корневой системе создать напряженность не менее 3,85 кВ/см, а для надземной (листостебельной) части – 3,68 кВ/см [17, 19]. Отметим, что значения удельной энергии и напряженности электрического поля у изученных растений различаются в разные годы исследований и в зависимости от периода их физиологического развития, состава и плодородия почвенных участков.

Экспериментально установлены следующие закономерности: сопротивление корневых систем больше сопротивления надземной части (стебля); сопротивление растительных тканей сорняков увеличивается по мере их развития и роста; электрическое сопротивление покровных тканей больше сопротивления внутренних тканей. Так, удельное сопротивление растительной ткани стебля и корневой системы различных сорняков для фазы развития «Стеблевание» составило 3,59…11,02 и 8,21…15,66 Ом·м соответственно, а для фазы «Начало плодоношения» – 5,20…11,82 и 9,40…31,24 Ом·м соответственно [18]. Сопротивление тканей эпидермиса у исследуемых сорных растений больше в 1,1…1,4 раза, чем сопротивление внутренних тканей стебля, а у тканей экзодермиса (корневой системы) – в 1,2…1,6 раза соответственно. Значения сопротивлений изученных сорных трав перемежаются между собой, не позволяя подразделить сорняки по биологическим видам: на многолетние, трудноискоренимые и однолетние, легко повреждающиеся электрическими разрядами [18].

Несмотря на необратимое повреждение растительной ткани, электроимпульсная обработка сохраняет полезную почвенную фауну и местообитание полезных микробов, например: 1) увеличивается количество азотфиксирующих бактерий, влияющих на превращение устойчивых форм органического вещества почвы, и накопление аммонийного азота; 2) увеличивается содержание нитратов в почве; 3) численность насекомых-герпетобионтов (жужелицы – *Calosoma furopunctatum*, *Poecilus puncticollis, Pseudoophonus rufipes*; долгоносики – *Ptochus porcellus, Lixus sp.*; чернотелки – *Opatrum sabulosum, Cripticus quisquilius* и др.) на опытных участках восстанавливается до уровня контроля спустя двое суток; 4) оказывается стимулирующее влияние на ризосферные микроорганизмы; 5) восстанавливается обилие микроорганизмов до уровня контроля, стабилизируется микрофлора[7].

Для обоснования конструкции мобильного малогабаритного электротехнологического устройства для борьбы с сорняками в садах, питомниках и виноградниках рассмотрим технологию обработки.

Обработка засоренных почвенных участков организуется за счет непосредственного контакта электродной системы с растениями. Наиболее эффективным является вариант обработки, при котором повреждающий ток протекает только по корневой системе растений. Такая обработка невозможна без использования хотя бы одного заглубленного в почву электрода, так как элементы корневой системы должны подвергаться продольному воздействию тока. Однако перемещение заглубленного в почву электрода создаст дополнительное тяговое сопротивление, и с точки зрения снижения общих затрат энергии на обработку засоренного массива электродную систему следует изготовить в виде навесных, разнопотенциальных электродов или комбинированно (из электродов,

[7] Юдаев И.В., Бренина Т.П., Прокофьев П.В. Влияние процесса электроимпульсной прополки на почвенную микрофлору и микроорганизмы // Экологические и экономические составляющие устойчивого развития региона: Материалы круглого стола, г. Волгоград, 27 марта 2008 г. Волгоград: Волгоградский государственный университет, 2008. С. 181-186. EDN: NQFFAE

расположенных над поверхностью, и одного или двух электродов, заглубленных в почву). В этих случаях организуется один из вариантов цепи протекания тока обработки: 1) «Навесной электрод – надземная часть растения – корневая система этого же растения – почва – корневая система другого растения – надземная часть другого растения – второй навесной электрод»; 2) «Навесной электрод – надземная часть растения – корневая система растения – почва – заглубленный электрод» [17, 20].

Отметим, что электроимпульсную прополку наиболее эффективно проводить в периоды ведения полевых работ при влажности почвы 20…25%, отличающейся минимальным значением удельного электрического сопротивления. При этом электрический контакт со стеблями сорняков следует осуществлять на минимальной высоте над землей, не допуская электрического пробоя на почву или контакта с ней (например, организуя обработку с высотой подвеса навесных электродов на уровне 3…5 см) [18].

Полевые исследования двух вариантов обработки показали закономерность: электрическое сопротивление цепей протекания тока линейно возрастает с увеличением расстояния между обрабатываемыми растениями и с увеличением высоты подвеса электродной системы и уменьшается по степенной зависимости с повышением влажности почвы.

В соответствии с исследованиями [17, 20] предельные затраты при импульсном воздействии электрической энергии, приводящем к гибели сорного растения, должны достигать следующих значений:

осот розовый (*Cirsium arvense L.*) – 125 Дж ($3{,}47 \cdot 10^{-5}$ кВт·ч);

осот полевой (*Sonchus arvensis L.*) – 190 Дж ($5{,}27 \cdot 10^{-5}$ кВт·ч);

молочай лозный (*Euphorbia waldsteinii L.*) – 740 Дж ($20{,}6 \cdot 10^{-5}$ кВт·ч);

молокан татарский (*Lactuca tatarica L.*) – 105 Дж ($2{,}92 \cdot 10^{-5}$ кВт·ч);

вьюнок полевой (*Convolvulus arvensis L.*) – 215 Дж ($5{,}97 \cdot 10^{-5}$ кВт·ч);

щирица запрокинутая (*Amaranthus retroflexus L.*) – 110 Дж ($3{,}06 \cdot 10^{-5}$ кВт·ч);

дурнишник обыкновенный (*Xanthium strumarium L.*) – 215 Дж ($5{,}97 \cdot 10^{-5}$ кВт·ч);

конопля сорнополевая (*Cannabis ruderalis L.*) – 140 Дж ($3{,}89 \cdot 10^{-5}$ кВт·ч);

марь городская (*Oxybasis urbica L.*) и марь белая (*Chenopodium album L.*) – 125 и 140 Дж ($3{,}47 \cdot 10^{-5}$ кВт·ч).

Электроимпульсная прополка почвенных участков в садах, виноградниках и плантациях должна проводиться в условиях малой ширины междурядий, выборочности воздействия, высоких экологических стандартов и запроса на автономность. Основываясь на экспериментально выявленных параметрах режима электроимпульсного высоковольтного уничтожения сорных трав, а также на результатах анализа конструктивных особенностей технического решения для мобильной установки, навешиваемой на колесный, промышленно выпускаемый трактор [20], и с учетом результатов исследований других ученых [21, 22] в первом приближении предложена компоновка малогабаритной, высокоманевренной электротехнологической установки для электроимпульсной прополки почвенных площадей (рис. 3) в виноградниках, садах и плантациях.

Предлагаемая электротехнологическая установка спроектирована на основе серийного мотоблока, способного маневрировать в узких междурядьях, на ограниченных почвенных площадях и склонах. Установка может оснащаться системой экспресс-контроля состояния обрабатываемой растительной ткани с обратной связью для оценки степени ее повреждения. Энергопотребление обеспечивается за счет



а б

Рис. 3. 3D-визуализация электротехнологической малогабаритной установки с электродной системой в виде стержней (а) и гибких пластин (б)

Fig. 3. 3D visualization of a compact electrotechnological unit featuring a rod-type electrode system (a) and flexible plate-type electrode system (b)

применения автономного генератора соответствующей мощности или аккумуляторов с возможностью длительного цикла работы без подзарядки. Несущая конструкция установки изготавливается как ремонтопригодная, адаптированная к отечественной компонентной и элементной базе. Электробезопасность установки обеспечивается надежной двойной изоляцией токопроводящих частей, постоянным контролем состояния изоляции, автоматическим отключением при разрыве цепи и защитой оператора от высоковольтного контакта, наличием световой сигнализации-оповещения и источника звуковых сигналов [23].

В прицепном устройстве установки прочно зафиксированы электротехнические компоненты: источник электрической энергии (фотоэлектрические модули и аккумуляторные батареи с системой управления их заряда и контроля его уровня); модуль повышения напряжения до технологически обоснованного уровня; модуль формирования высоковольтных импульсов и управления частотой их следования. Последние модули размещаются под крышкой прицепа либо в специальных диэлектрических коробах, либо с дополнительными разделительными диэлектрическими экранами между ними. На верхней части крышки размещаются проблесковый маячок и система звуковой сигнализации для предупреждения окружающих о том, что проводится электрообработка почвенного участка.

Электродная система представляет собой как отдельные навесные электроды, так и их комбинацию (навесные электроды и электрод, заглубляемый в почву). Применение конкретного компонентного состава электродной системы определяется степенью засоренности участка конкретными видами сорных растений. Заглубляемый электрод, изготовленный в виде диска с заостренными кромками или в виде черенкового ножа из нержавеющей стали, рекомендуется применять на почвенных участках с корнеотпрысковыми сорняками. Навесная система (рис. 4б) представляет собой несколько секций из отдельных цилиндрических электродов из нержавеющей стали с режущими кромками-проточками по их активной длине (рис. 3а и 4а) или в виде гибких нержавеющих пластин (рис. 3б). В первом случае навесные электроды применяются при обработке прямостоящих растений и растений с огрубевшей поверхностной тканью стебля для снижения переходного электрического сопротивления в месте контакта. Во втором случае электроды навесной системы, скользя по поверхности почвы, организуют замкнутую электрическую цепь между отдельными секциями и заглубленным в почву электродом, в которую оказываются включенными все низкорослые и стелющиеся виды сорных и нежелательных трав.

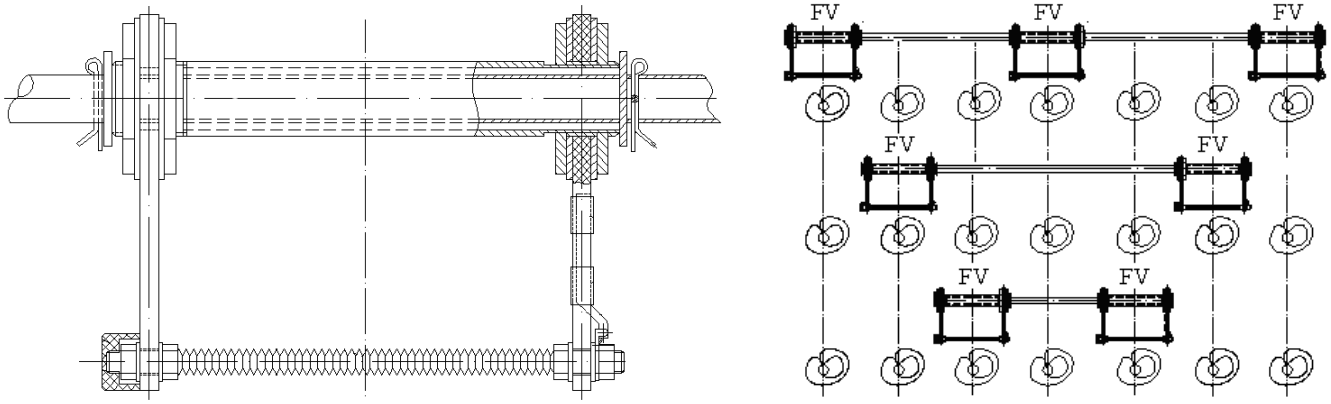
Для необратимого повреждения внутриклеточных компонентов растительной ткани сорняков со средней засоренностью почвенного массива 3…6 шт/м^2 к электродной системе шириной захвата 0,92 и 1,62 м должно подводиться соответствующее количество энергии:

осот розовый (*Cirsium arvense L.*) – 0,291 и 0,441 Вт·ч;

осот полевой (*Sonchus arvensis L.*) – 0,204 и 0,293 Вт·ч;

молочай лозный (*Euphorbia waldsteinii L.*) – 1,172 и 1,565 Вт·ч;

молокан татарский (*Lactuca tatarica L.*) – 0,214 и 0,329 Вт·ч;



а б

Рис. 4. Конструкция электродов:
а – нержавеющие стержни с острийными проточками по активной длине электрода;
б – размещение секционных электродов (FV) в электродной системе (эскиз)

Fig. 4. Electrode design:
a – stainless steel rods with pointed grooves along the active length of the electrode;
b – arrangement of sectional electrodes (FV) within the electrode system (sketch)

вьюнок полевой (*Convolvulus arvensis L.*) – 0,522 и 0,844 Вт·ч;

щирица запрокинутая (*Amaranthus retroflexus L.*) – 0,092 и 0,131 Вт·ч;

дурнишник обыкновенный (*Xanthium strumarium L.*) – 0,247 и 0,364 Вт·ч;

конопля сорнополевая (*Cannabis ruderalis L.*) – 0,196 и 0,309 Вт·ч;

марь городская (*Oxybasis urbica L.*) и марь белая (*Chenopodium album L.*) – 0,097…0,153 и 0,128…0,184 Вт·ч [22].

Основные параметры электротехнологической установки по прополке засоренных почвенных массивов. Согласно экспериментальным данным для необратимого повреждения внутриклеточных структур обрабатываемых сорных растений напряжение на электродах $U_{ЭС}$ мобильной электротехнологической установки составляет не менее 10…15 кВ.

Напряжение на выходном блоке установки $U_{РК}$ (в исследуемом варианте – на разрядном контуре генератора) должно превышать напряжение на электродах $U_{ЭС}$ на величину падения напряжения $\Delta U_{РК\text{-}Э}$ в цепи «Разрядная емкость – система электродов»:

$$U_{РК} \geq U_{ЭС} + \Delta U_{РК–Э}$$
$$\text{или } U_{РК} = K_U(U_{ЭС} + \Delta U_{РК–Э}), \quad (2)$$

где K_U – коэффициент, учитывающий неполноту разрядки выходной емкости.

К каждому сорному растению необходимо подвести количество энергии, достаточное для надежного повреждения внутриклеточных компонентов его растительной ткани. Это количество электрической энергии, можно определить, например, произведением удельной повреждающей энергии $W_{уд}$ на единицу объема $V_{рт}$ растительной ткани и на число N одновременно обрабатываемых сорных трав. Кроме того, необходимо учесть суммарные потери электрической энергии в переходных контактах цепи обработки и в почве ΔW:

$$W = (W_{уд} \cdot V_{рт} + \Delta W) \cdot N. \quad (3)$$

Электрическая энергия разрядного контура $W_К$ должна превышать энергию W, подводимую к разрядной цепи, на величину энергии $W_о$, остающейся в разрядном конденсаторе ввиду неполной разрядки последнего:

$$W_K = W + W_о = (W_{уд} \cdot V_{рт} + \Delta W) \cdot N + W_о. \quad (4)$$

Зная рабочее напряжение установки, можно оценить значение разрядного конденсатора выходного контура $C_К$:

$$C_К = \frac{2 \cdot \left[(W_{уд} \cdot V_{рт} + \Delta W) \cdot N + W_о \right]}{K_U^2 \cdot (U_{ЭС} + \Delta U_{РК–Э})^2}. \quad (5)$$

Для выполнения требований по технике электробезопасности [22] на рукоятках рулевой колонки мотоблока планируется разместить коммутационные аппараты с ручным управлением. В поле зрения оператора необходимо расположить сенсорную панель контроля за процессом обработки, на которую должна выводиться цифровая индикация, показывающая заряд аккумуляторных батарей, наличие напряжения питания блоков (повышающего напряжение до технологически обоснованного значения и формирующего импульсы), значение тока утечки и другую информацию. Под сидением водителя-оператора необходимо смонтировать кнопочную станцию с замыкающим контактом, не позволяющим начать обработку, если оператор-водитель не займет свое место. Дополнительной рекомендацией для оператора является использование диэлектрических бот и перчаток во время проведения полевых работ.

Таким образом, агробиоэлектротехнология обеспечивает селективное уничтожение сорных трав, воздействуя на сорняки строго дозированными микросекундными импульсами и необратимо повреждая внутриклеточную структуру их тканей. При непроизвольном касании электрода с покровными тканями деревьев, кустарников и виноградных лоз последние не повреждаются благодаря подпружиненной конструкции крепления электродной системы.

Выводы

1. Разрабатываемая агробиоэлектротехнологическая операция позволяет эффективно, с минимальным негативным антропогенным влиянием и высокой технологической эффективностью бороться с сорными и нежелательными растениями на почвенных площадях виноградников, плантаций и садов. Для необратимого повреждения внутриклеточных компонентов тканей однолетних и многолетних сорняков должна затрачиваться энергия 110…215 и 125…740 Дж/растение соответственно. При этом амплитуда импульса должна достигать 10…15 кВ, длительность импульса – 20…60 мкс, частота следования импульсов – 1…5 Гц, минимальная энергия воздействующего импульса – 1,5…2,0 Дж.

2. Необходимо продолжить испытания и поиск схемного решения электрической части установки. В целях повышения агротехнологической эффективности следует модернизировать представленную конструкцию для ее согласованной работы с минитрактором.

3. Результаты исследований послужат основой для конструкторского проекта и опытного (пилотного) варианта установки.

Список источников

1. Колбасин А.В., Баранов А.Г., Баранова Е.В., Батракова О.А. Состояние и тенденции развития виноградарства в Российской Федерации // Финансовая экономика. 2024. № 12. С. 309-315. EDN: TVRCJJ

2. Закшевский В.Г., Аскеров П.Ф., Павлов А.Ю. и др. Состояние и приоритетные направления развития садоводства России // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. 2024. № 9. С. 131-139. https://doi.org/10.33938/249-131

3. Beckie H.J., Flower K.C., Ashworth M.B. Farming without Glyphosate? Plants. 2020;9(1):96. https://doi.org/10.3390/plants9010096

4. Coleman G.R.Y., Stead A., Rigter M.P. et al. Using energy requirements to compare the suitability of alternative methods for broadcast and site-specific weed control – CORRIGENDUM. Weed Technology. 2020;34(1):153-154. https://doi.org/10.1017/wet.2019.131

5. Bloomer D.J., Harrington K.C., Ghanizadeh H., James T.K. Pots to plots: Microshock weed control is an effective and energy efficient option in the field. Sustainability. 2024;16(11):4324. https://doi.org/10.3390/su161143246.

6. Wilson R.G., Anderson F.N. Control of three weed species in Sugarbeets (Beta Vulgaris) with an electrical discharge system. Weed Science. 1981;29(1):93-98. https://doi.org/10.1017/S004317450002590X

7. Diprose M.F., Benson F.A. Electrical methods of killing plants. Journal of Agricultural Engineering Research. 1984;30:197-209. https://doi.org/10.1016/S0021-8634(84)80021-9

8. Slaven M.J., Koch M., Borger C.P.D. Exploring the potential of electric weed control: A review. Weed Science. 2023;71(5):403-421 https://doi.org/10.1017/wsc.2023.38

9. Rask A.M., Kristoffersen P. A review of non-chemical weed control on hard surfaces. Weed Research. 2007;47(5):370-380. https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2007.00579.x

10. Lehnhoff E.A., Neher P., Indacochea A., Beck L. Electricity as an effective weed control tool in non-crop areas. Weed Research. 2022;62(2):149-159. https://doi.org/10.1111/wre.12523

11. Клочков А.В. Механические и физические методы борьбы с сорняками // Наше сельское хозяйство. 2020. № 15. С. 80-87. EDN: YPXXRG

12. Юдаев И.В. Технологически эффективная и экологически безопасная борьба с сорными растениями // Сельский механизатор. 2020. № 8. С. 2-3. EDN: VDWPEN

13. Borger C.P.D., Slaven M.J. Electric weed control-how does it compare to conventional weed control methods? Weed Science. 2025;73(1):e46. https://doi.org/10.1017/wsc.2025.18

14. Slaven M.J., Borge C.P. Electric weed control for the management of annual ryegrass and herbicide resistance, 23rd Australasian Weeds Conference – Breaking the Cycle: Towards Sustainable Weed Mangement, Brisbane. 2024. Pp. 141-145. https://library.dpird.wa.gov.au/conf_papers/300

15. Baccin L.C., Moretti M.L. Electrical weed control in organic highbush blueberry: influence of operational speed and number of applications on weed control. Frontiers in Agronomy. 2025;7:1688961. https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1688961

16. Baev V.I., Yudaev I.V. Efficiency estimation of type of the electrical exposure on plants at their processing. Ad Alta. 2018;8(1):252-257. EDN: ZCVUOL

17. Judaev I.V., Brenina T.P. The definition of electro impulses used in weed control. Journal of agricultural sciences, Belgrade. 2008;53(1):37-44. https://doi.org/10.2298/JAS0801037J

18. Юдаев И.В., Даус Ю.Д. Электропроводные свойства сорных растений – объектов высоковольтного импульсного воздействия // Электронная обработка материалов. 2020. Т. 56, № 2. С. 41-48. EDN: LVYYYI https://doi.org/10.5281/zenodo.3747843

References

1. Kolbasin A.V., Baranov A.G., Baranova E.V., Batrakova O.A. State and trends of vitigrowing development in the Russian Federation. *Finansovaya ekonomika*. 2024;12:309-315. (In Russ.)

2. Zakshevsky V.G., Askerov P.F., Pavlov A.Yu. et al. Status and priority areas of development gardening in Russia. *Economics, Labor, Management in Agriculture*. 2024;9(115):131-139. (In Russ.)

3. Beckie H.J., Flower K.C., Ashworth M.B. Farming without Glyphosate? *Plants*. 2020;9(1):96. https://doi.org/10.3390/plants9010096

4. Coleman G.R.Y., Stead A., Rigter M.P. et al. Using energy requirements to compare the suitability of alternative methods for broadcast and site-specific weed control – CORRIGENDUM. *Weed Technology*. 2020;34(1):153-154. https://doi.org/10.1017/wet.2019.131

5. Bloomer D.J., Harrington K.C., Ghanizadeh H., James T.K. Pots to plots: Microshock weed control is an effective and energy efficient option in the field. *Sustainability*. 2024;16(11):4324. https://doi.org/10.3390/su16114324

6. Wilson R.G., Anderson F.N. Control of three weed species in Sugarbeets (Beta Vulgaris) with an electrical discharge system. *Weed Science*. 1981;29(1):93-98. https://doi.org/10.1017/S004317450002590X

7. Diprose M.F., Benson F.A. Electrical methods of killing plants. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1984;30:197-209. https://doi.org/10.1016/S0021-8634(84)80021-9

8. Slaven M.J., Koch M., Borger C.P.D. Exploring the potential of electric weed control: A review. *Weed Science*. 2023;71(5):403-421 https://doi.org/10.1017/wsc.2023.38

9. Rask A.M., Kristoffersen P. A review of non-chemical weed control on hard surfaces. *Weed Research*. 2007;47(5):370-380. https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2007.00579.x

10. Lehnhoff E.A., Neher P., Indacochea A., Beck L. Electricity as an effective weed control tool in non-crop areas. *Weed Research*. 2022;62(2):149-159. https://doi.org/10.1111/wre.12523

11. Klochkov A.V. Mechanical and physical methods of weed control. *Nash selskoe khozyaystvo*. 2020;15:80-87. (In Russ.)

12. Yudaev I.V. Technologically effective and environmentally safe weed control. *Selskiy mekhanizator*. 2020;8:2-3. (In Russ.)

13. Borger C.P.D., Slaven M.J. Electric weed control–how does it compare to conventional weed control methods? *Weed Science*. 2025;73(1):e46. https://doi.org/10.1017/wsc.2025.18

14. Slaven M.J., Borge C.P. Electric weed control for the management of annual ryegrass and herbicide resistance, *23rd Australasian Weeds Conference – Breaking the Cycle*: *Towards Sustainable Weed Mangement, Brisbane*. 2024. Pp.141-145. https://library.dpird.wa.gov.au/conf_papers/300

15. Baccin L.C., Moretti M.L. Electrical weed control in organic highbush blueberry: influence of operational speed and number of applications on weed control. *Frontiers in Agronomy*. 2025;7:1688961. https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1688961

16. Baev V.I., Yudaev I.V. Efficiency estimation of type of the electrical exposure on plants at their processing. *Ad Alta*. 2018;8(1):252-257. EDN: ZCVUOL

17. Judaev I.V., Brenina T.P. The definition of electro impulses used in weed control. *Journal of Agricultural Sciences, Belgrade*. 2008;53(1):37-44. https://doi.org/10.2298/JAS0801037J

18. Yudaev I.V., Daus Yu.D. Electrical conductive properties of weeds subjected to high-voltage pulse treatment. *Electronic processing of materials*. 2020;56(2):41-48. (In Russ.)

19. Yudaev I.V., Daus Yu.V., Panchenko V.A., Bolshev V.E. Influence of factors determining weeds' plant tissue reaction to the electric pulse damage impact. *Agriculture*. 2023;13(5):1099. https://doi.org/10.3390/agriculture13051099

19. Yudaev I.V., Daus Yu.V., Panchenko V.A., Bolshev V.E. Influence of factors determining weeds' plant tissuereaction to the electric pulse damage impact. Agriculture. 2023;13(5):1099. https://doi.org/10.3390/agriculture13051099

20. Yudaev I.V., Daus Yu.V., Sharov I.V. Electropulse weed control as an element of organic farming in sustainable agriculture. Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2025;61(6):925-936. https://doi.org/10.3103/S1068375525701005

21. Ляпин В.Г., Загинайлов В.И., Андреев С.А. Моделирование электрофизических свойств растительных объектов при электротехнологическом воздействии // Вестник АПК Верхневолжья. 2025. № 4(72). С. 147-159. https://doi.org/10.35694/YARCX.2025.72.4.022

22. Ляпин В.Г., Лобачевский Я.П., Загинайлов В.И., Селезнева Д.М. Концепция развития мобильных электротехнологических установок в защите растений от сорняков // Российская сельскохозяйственная наука. 2025. № 6. С. 28-39. https://doi.org/10.7868/S3034582025060066

23. Yudaev I., Daus Y., Prokofiev P., Baev I., Panchenko V. On the issue on automation of the security system of mobile electrotechnological installations. *Intelligent Computing and Optimization. ICO 2023. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2024;874:195-202. https://doi.org/10.1007/978-3-031-50887-5_20

20. Yudaev I.V., Daus Yu.V., Sharov I.V. Electropulse weed control as an element of organic farming in sustainable agriculture. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2025;61(6):925-936. https://doi.org/10.3103/S1068375525701005

21. Lyapin V.G., Zaginaylov V.I., Andreev S.A. Modeling the electrophysical properties of plant objects under electrotechnological impact. *Vestnik APK Verkhnevolzhya*. 2025;4:147-159. (In Russ.) https://doi.org/10.35694/YARCX.2025.72.4.022

22. Lyapin V.G., Lobachevsky Ya.P., Zaginailov V.I., Selezneva D.M. Concept of development of mobile electrotechnological installations in plant protection from weeds. *Russian Agricultural Science*. 2025;6:28-39. (In Russ.) https://doi.org/10.7868/S3034582025060066

23. Yudaev I., Daus Y., Prokofiev P., Baev I., Panchenko V. On the issue on automation of the security system of mobile electrotechnological installations. *Intelligent Computing and Optimization. ICO 2023. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2024;874:195-202. https://doi.org/10.1007/978-3-031-50887-5_20

Информация об авторах

[1] **Юдаев Игорь Викторович,** д-р техн. наук, профессор; etsh1965@mail.ru; etsh1965@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-3435-4873; SPIN-код: 6836-5529
[2] **Даус Юлия Владимировна,** д-р техн. наук, доцент; zirochka3011@gmail.com; https://orcid.org/0000-0001-9120-7637; SPIN-код: 6048-0509
[3] **Шаров Иван Васильевич,** магистрант-соискатель; ivanshar98@gmail.com; SPIN-код: 5430-2439
[4] **Рожков Евгений Александрович,** канд. техн. наук, доцент; zhenyacool31@yandex.ru; https://orcid.org/0009-0003-8607-0252; SPIN-код: 5789-8341
[5] **Рудь Евгений Евгеньевич,** аспирант; eugene.rud@yandex.ru; https://orcid.org/0009-0000-9779-5564; SPIN-код: 3270-4101
[1, 2, 3, 4, 5] Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина; 350044, Российская Федерация, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. Калинина, 13

Author Information

Igor V. Yudaev[1], DSc (Eng), Professor, etsh1965@mail.ru; etsh1965@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-3435-4873
Yulia V. Daus[2], DSc (Eng), Associate Professor; zirochka3011@gmail.com; https://orcid.org/0000-0001-9120-7637
Ivan V. Sharov[3], Master student; ivanshar98@gmail.com;
Evgeniy A. Rozhkov[4], CSc (Eng), Associate Professor; zhenyacool31@yandex.ru; https://orcid.org/0009-0003-8607-0252
Evgeniy E. Rud[5], postgraduate student; eugene.rud@yandex.ru; https://orcid.org/0009-0000-9779-5564
[1, 2, 3, 4, 5] Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin; 13, st. Kalinina, Krasnodar, 350044, Russian Federation

Вклад авторов

И.В. Юдаев – концептуализация;
Ю.В. Даус – методология;
И.В. Шаров – формальный анализ, создание черновика рукописи;
Е.А. Рожков – формальный анализ, визуализация;
Е.Е. Рудь – проведение исследования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Author Contribution

I.V. Yudaev – conceptualization;
Yu.V. Daus – methodology;
I.V. Sharov – data curation; validation; writing – original draft;
E.A. Rozhkov – formal analysis; validation; visualization;
E.E. Rud – investigation; data curation; formal analysis.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interests regarding the publication.

Статья поступила 02.04.2026, после рецензирования и доработки 14.05.2026, принята к публикации 05.06.2026

Received 02.04.2026; Revised 14.05.2026; Accepted 05.06.2026