Научная статья
УДК 631.348.8
doi: 10.35694/YARCX.2026.73.1.010

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА MODDE ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОГО УНИЧТОЖЕНИЯ СОРНЫХ РАСТЕНИЙ МЕТОДОМ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА

Артем Сергеевич Угловский
Ярославский государственный аграрный университет, Ярославль, Россия
a.uglovskii@yarcx.ru, ORCID 0000-0002-5678-4786

Реферат. В работе представлены результаты исследования по оптимизации параметров электрофизического воздействия на сорные растения с целью повышения эффективности их уничтожения. Актуальность исследования продиктована необходимостью разработки экологически безопасных агротехнических методов, способных стать альтернативой химической гербицидной обработке. В качестве основного аналитического инструмента для планирования экспериментов и математической обработки данных применён программный комплекс MODDE. В статье подробно рассматриваются два этапа многофакторного эксперимента. На первом этапе была построена регрессионная модель второго порядка, описывающая зависимость степени уничтожения от напряжения разряда, энергии и времени воздействия. Полученное уравнение регрессии (R^2 = 0,97) позволило выявить значимые нелинейные эффекты, в частности, эффект насыщения по энергии, подтверждённый отрицательным квадратичным членом. Второй этап исследования был сосредоточен на изучении влияния разрядного тока и времени воздействия при фиксированном напряжении 24 кВ. Построенная модель показала высокую прогностическую способность (Q^2 = 0,964). С помощью анализа поверхностей отклика и контурных карт изолиний в среде MODDE определены области параметров, обеспечивающие максимальную эффективность процесса. В результате работы установлены конкретные рациональные режимы обработки. Оптимизация показала, что доминирующее влияние на результат оказывают энергетические параметры (энергия и ток), в то время как время воздействия выполняет вспомогательную функцию. Полученные результаты имеют высокую практическую значимость для конструирования мобильных электрофизических установок, обеспечивая высокую информативность и воспроизводимость технологических режимов.

Ключевые слова: *электрофизическое воздействие, уничтожение сорных растений, многофакторный эксперимент, регрессионный анализ, поверхность отклика, оптимизация параметров, MODDE, напряжение разряда, разрядный ток*

APPLICATION OF THE MODDE SOFTWARE PACKAGE FOR OPTIMIZING THE PARAMETERS OF ELECTROPHYSICAL WEED CONTROL USING REGRESSION ANALYSIS

Artem S. Uglovskiy
Yaroslavl State Agrarian University, Yaroslavl, Russia
a.uglovskii@yarcx.ru, ORCID 0000-0002-5678-4786

Abstract. The paper presents the results of a study on optimizing the parameters of electrophysical effect on weeds in order to increase the efficiency of their destruction. The relevance of the research is dictated by the need to develop environmentally friendly agrotechnical methods that can become an alternative to chemical herbicide treatment. The MODDE software package was used as the main analytical tool for planning experiments and mathematical data processing. The article discusses in detail two stages of a multifactorial experiment. At the first stage, a second-order regression model was constructed, describing the dependence of the degree of destruction on the discharge voltage, energy and exposure time. The resulting regression equation (R^2 = 0.97) made it possible to identify significant nonlinear effects, in particular, the energy saturation effect confirmed by the negative quadratic term. The second phase of the study focused on the

effect of discharge current and exposure time at a fixed voltage of 24 kV. The constructed model showed a high predictive ability (Q^2 = 0.964). Using response surface analysis and contour line maps of isolines in the MODDE environment the parameter areas providing maximum process efficiency were determined. As a result of the work, specific rational operating modes have been established. The optimization showed that energy parameters (energy and current) have a dominant effect on the result, while exposure time performs an auxiliary function. The obtained results are of high practical importance for the design of mobile electrophysical installations, providing high information content and reproducibility of technological modes.

Keywords: *electrophysical action, weed control, multivariate experiment, regression analysis, response surface, parameter optimization, MODDE, discharge voltage, discharge current*

Введение. Одной из наиболее острых проблем современного земледелия является высокая засорённость посевов, снижающая урожайность и качество продукции. Традиционное применение гербицидов ведёт к накоплению токсичных веществ в почве и формированию резистентных популяций сорных растений. В связи с этим разработка технических средств прямого электрофизического воздействия на растительные ткани является приоритетным направлением. Общие закономерности воздействия импульсных полей на биологические объекты и возможности их применения подробно раскрыты в работах K. Nowosad et al. [1] и E. Vorobiev, N. I. Lebovka [2]. Фундаментальные основы использования электрического тока на ткани растений заложили M. F. Diprose et al. [3] и C. Vigneault et al. [4]. В своих работах они не только доказали принципиальную возможность уничтожения растений электричеством, но и описали базовую физику процесса: прохождение тока через стебель и корень вызывает нагрев, который разрушает ткани. Как отмечают авторы [5–7], критически важно достичь стадии необратимой реакции, когда клетка не может восстановиться и погибает.

В последние годы интерес к практическому применению электрической прополки значительно возрос. Так, авторы Y. Matsuda et al. [8] представили разработку автономного электрического культиватора (UEW) для борьбы с сорными растениями в питомниках фруктовых садов, доказав техническую реализуемость метода в полевых условиях. Потенциал электрического уничтожения сорной растительности также исследовался в работе M. J. Slaven et al. [9], где подтверждается перспективность данного подхода как альтернативы химическим средствам защиты. Кроме того, исследования R. Ramaswamy et al. [10] в области обработки импульсными полями подтверждают высокую эффективность метода в разрушении клеточных стенок, что является критическим фактором для гибели растения. Однако, несмотря на наличие инженерных решений, проблема выбора оптимальных параметров тока (напряжения, энергии, длительности импульса) остаётся открытой.

Научная новизна работы заключается в применении комплексного подхода к планированию эксперимента в среде MODDE, что позволило не только установить линейные зависимости, но и выявить сложные взаимодействия факторов (энергии, напряжения и тока), а также обнаружить зоны «энергетической избыточности» процесса через анализ квадратичных эффектов.

Цель исследования – установление количественных закономерностей влияния параметров электрофизического разряда на степень уничтожения сорных растений методом математического планирования эксперимента и поиск оптимальных режимов работы оборудования, обеспечивающих целевой уровень гибели сорных растений при рациональных затратах энергии.

Материалы и методы исследования. Исследование выполнено на основе многофакторного эксперимента с использованием методов регрессионного анализа второго порядка. В качестве факторов рассматривались напряжение разряда (U), энергия воздействия (E), время воздействия (T_a) и разрядный ток (I_a). В качестве отклика (зависимой переменной) в регрессионной модели использовалась степень уничтожения сорных растений (y), выраженная в процентах [11; 12].

Данный показатель рассчитывался как относительное снижение количества жизнеспособных растений после обработки по сравнению с контрольной группой.

Планирование эксперимента осуществлялось с использованием квадратичного плана, позволяющего оценить не только линейное влияние факторов, но и их квадратичные и взаимодействующие эффекты. Обработка экспериментальных данных включала построение полной квадратичной регрессионной модели второго порядка. Оценка коэффициентов регрессии выполнялась методом наименьших квадратов. Адекватность модели проверялась по коэффициенту детерминации (R^2), а также по анализу значимости коэффициентов регрессии.

Для анализа полученных моделей применялись прогнозные графики, позволяющие оценить индивидуальное влияние каждого фактора при фиксированных средних значениях остальных параметров. Дополнительно строились поверхности отклика и контурные карты изолиний, обеспечи-

вающие наглядное представление нелинейного характера процесса и выявление областей рациональных сочетаний факторов.

Экспериментальные данные обрабатывались в программной среде MODDE с построением полных квадратичных регрессионных моделей, анализом статистической значимости коэффициентов, прогнозных графиков и поверхностей отклика. Для определения рациональных режимов применялся встроенный модуль оптимизации по критерию достижения заданного уровня уничтожения сорных растений.

Для анализа зависимости степени уничтожения сорных растений от указанных факторов была построена многофакторная регрессионная модель второго порядка. Зависимость степени уничтожения сорных растений (y) от напряжения разряда (U), энергии воздействия (E) и времени воздействия (T_a) описывается полной квадратичной регрессионной моделью второго порядка:

$$y = b_o + b_1U + b_2E + b_3T_a + b_{11}U^2 + b_{22}E^2 + b_{33}T_a^2 + b_{12}UE + b_{13}UT_a + b_{23}Et_a, \quad (1)$$

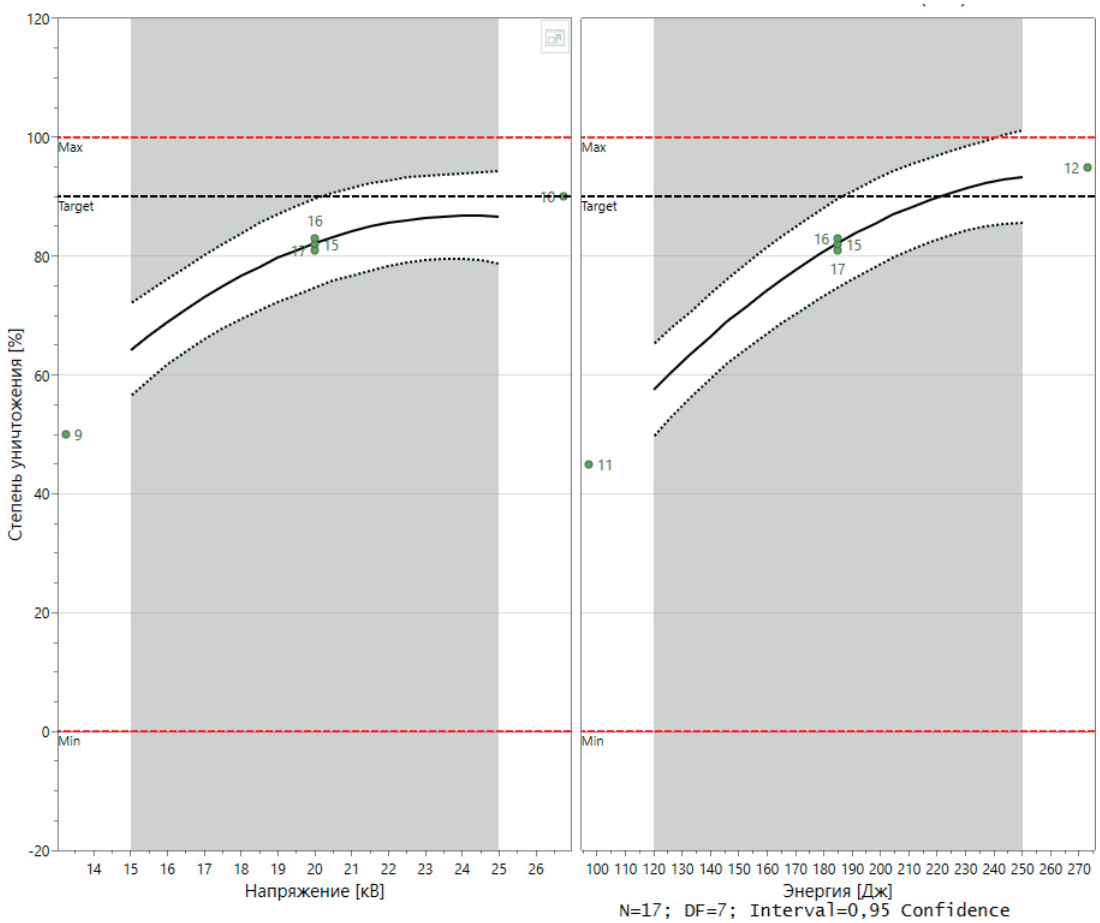
где b_o – свободный член; b_i, b_{ii}, b_{ij} – коэффициенты регрессии, соответствующие линейным, квадратичным и взаимодействующим эффектам факторов.

Результаты исследования. В результате регрессионного анализа получено следующее уравнение регрессии:

$$y = 82{,}1686 + 11{,}1581 \cdot U + 17{,}9779 \cdot E + 11{,}9149 \cdot T_a - 6{,}76428 \cdot U^2 - 6{,}76418 \cdot E^2 - 10{,}0412 \cdot T_a^2 + 0{,}25 \cdot U \cdot E + 1{,}75 \cdot U \cdot T_a + 3{,}5 \cdot E \cdot T_a. \quad (2)$$

Полученная модель является полной квадратичной моделью отклика и учитывает как линейное влияние факторов, так и их взаимодействие и нелинейные эффекты. Значение коэффициента детерминации составляет $R^2 = 0{,}97$, что свидетельствует о высокой степени соответствия модели расчётным данным и позволяет использовать её для анализа закономерностей процесса в рассматриваемой области параметров.

Наличие отрицательных квадратичных членов при всех трёх факторах (U^2, E^2, T_a^2) свидетельствует о нелинейном характере процесса и существовании оптимальных значений параметров воздействия. Отрицательный коэффициент при E^2 указывает на то, что после достижения опреде-



а) б)

Рисунок 1 – Прогнозная зависимость степени уничтожения сорных растений от напряжения (а) и энергии (б), полученная по данным многофакторной регрессионной модели

лённого уровня подведённой энергии дальнейшее её увеличение не обеспечивает сопоставимого роста степени уничтожения сорных растений.

Аналогично отрицательные коэффициенты при U^2 и T_a^2 указывают на наличие предельных значений напряжения разряда и времени воздействия, превышение которых сопровождается снижением темпа прироста эффективности. Следовательно, эффект насыщения характерен не только для энергии, но и для остальных факторов, что подтверждает необходимость их совместной оптимизации.

Кроме того, положительный коэффициент взаимодействия $U \cdot E$ указывает на согласованное влияние напряжения и энергии, при котором увеличение энергии наиболее эффективно реализуется при повышенных значениях напряжения.

На рисунке 1 представлены прогнозные зависимости степени уничтожения сорных растений от напряжения (а) и энергии (б), полученные на основе регрессионной модели при фиксированных средних значениях остальных факторов.

На прогнозном графике зависимости степени уничтожения сорных растений от напряжения разряда (рис. 1а) наблюдается устойчивый рост отклика при увеличении напряжения в исследуемом диапазоне 15–25 кВ.

В области низких значений напряжения (15–18 кВ) увеличение степени уничтожения происходит относительно медленно, что связано с недостаточной интенсивностью электрического поля для формирования необратимых повреждений растительных тканей. При дальнейшем увеличении напряжения (18–22 кВ) наблюдается заметное усиление эффекта, выражающееся в резком росте степени уничтожения сорных растений. В диапазоне напряжений выше 22–23 кВ скорость прироста отклика снижается, что указывает на формирование эффекта насыщения процесса и ограниченность дальнейшего увеличения эффективности при росте напряжения.

Прогнозная зависимость степени уничтожения сорных растений от энергии воздействия (рис. 1б) также носит возрастающий характер, однако отличается менее крутым наклоном кривой по сравнению с зависимостью от напряжения. Это свидетельствует о том, что энергия воздействия выполняет преимущественно усиливающую функцию и не является самостоятельным доминирующим фактором процесса. При увеличении энергии от 120 до 180–200 Дж наблюдается существенный рост степени уничтожения, тогда как дальнейшее увеличение энергетических затрат приводит к снижению темпа роста эффективности.

Напряжение разряда играет ключевую роль в формировании пороговых условий электрофизического воздействия, обеспечивая переход процесса в область необратимых повреждений растительных тканей. В то же время количественный уровень степени уничтожения сорных растений в основном определяется энергетическими параметрами воздействия. Полученные результаты подтверждают целесообразность совместного учёта всех трёх факторов при выборе режимов электрофизического воздействия и служат основанием для дальнейшей оптимизации параметров процесса.

Для исследования совместного влияния факторов и выявления нелинейных эффектов были построены поверхности отклика (рис. 2).

Анализ поверхности отклика (рис. 2а) показывает криволинейный характер зависимости степени уничтожения сорных растений от напряжения и энергии воздействия. Наличие квадратичных и взаимодействующих членов в уравнении регрессии подтверждает нелинейный характер процесса и указывает на существование области оптимальных параметров.

Контурные линии поверхности отклика (рис. 2б) позволяют выделить область параметров, в которой достигается высокая степень уничтожения сорных растений. При этом максимальные значения отклика достигаются при повышенных значениях напряжения и умеренных значениях энергии, что подтверждает наличие эффекта насыщения при чрезмерном увеличении энергетических параметров.

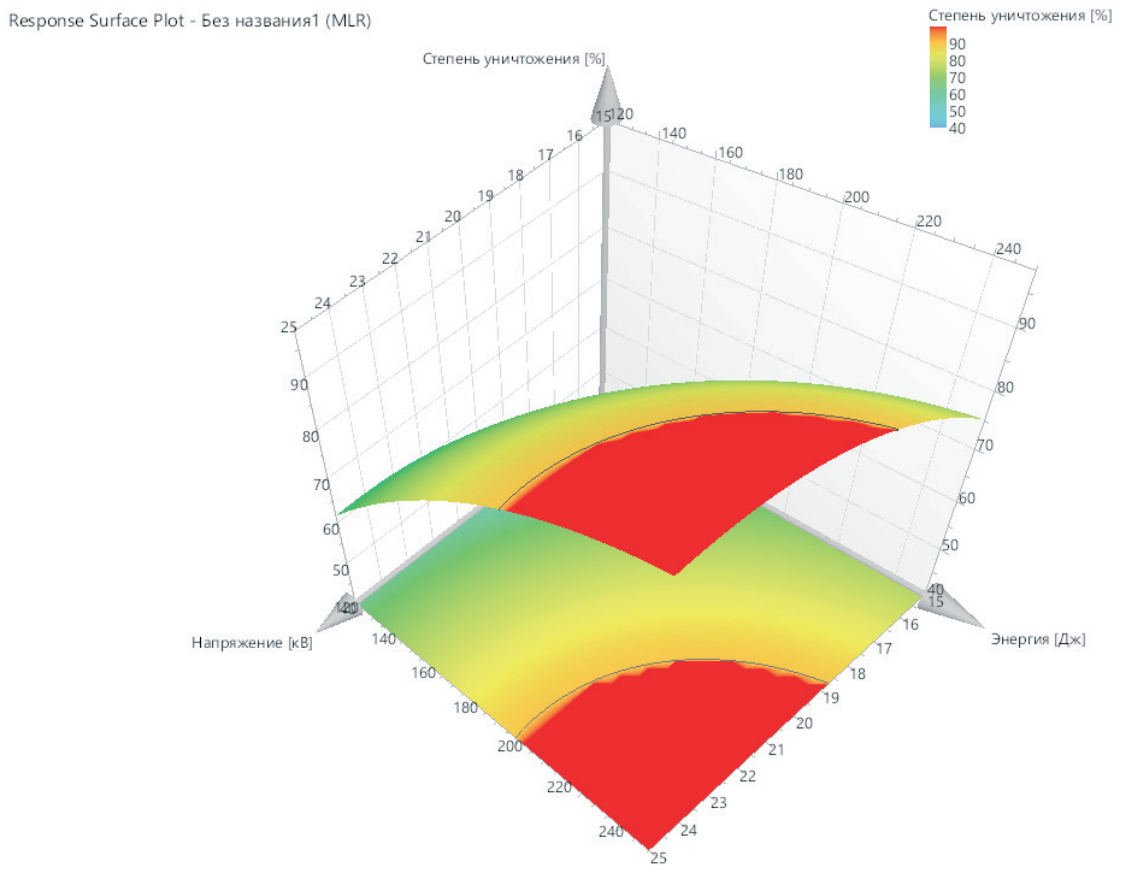
С использованием модуля оптимизации MODDE была выполнена оптимизация параметров процесса по целевому критерию достижения степени уничтожения сорных растений на уровне не ниже 80%. Результаты оптимизации представлены на рисунке 3.

В результате оптимизации были определены следующие рациональные параметры процесса:

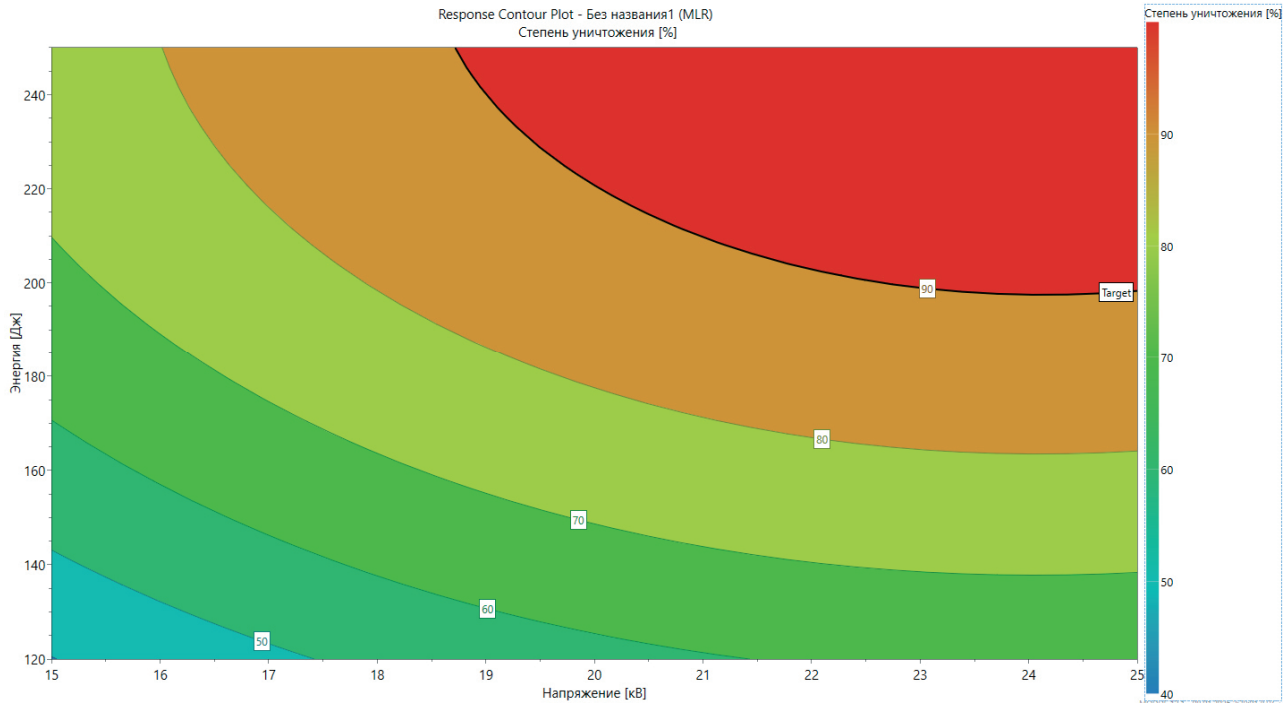
1) напряжение $U \approx 24$ кВ;
2) энергия $E \approx 160$ Дж;
3) время воздействия $T_a \approx 5{,}2$ с.

При данных параметрах прогнозируемая степень уничтожения сорных растений составляет около 83%, а вероятность отказа не превышает 0,1%, что указывает на устойчивость найденного решения. Анализ вклада факторов показывает, что доминирующее влияние на результат оказывает энергия воздействия, вклад которой превышает 85%, тогда как влияние напряжения и времени носит вспомогательный характер.

Проведённый многофакторный эксперимент и регрессионный анализ позволили установить закономерности влияния параметров электрофизического воздействия на степень уничтожения сорных растений, выявить нелинейный характер процесса и определить рациональные режимы обработки. Использование методов планирования экспери-



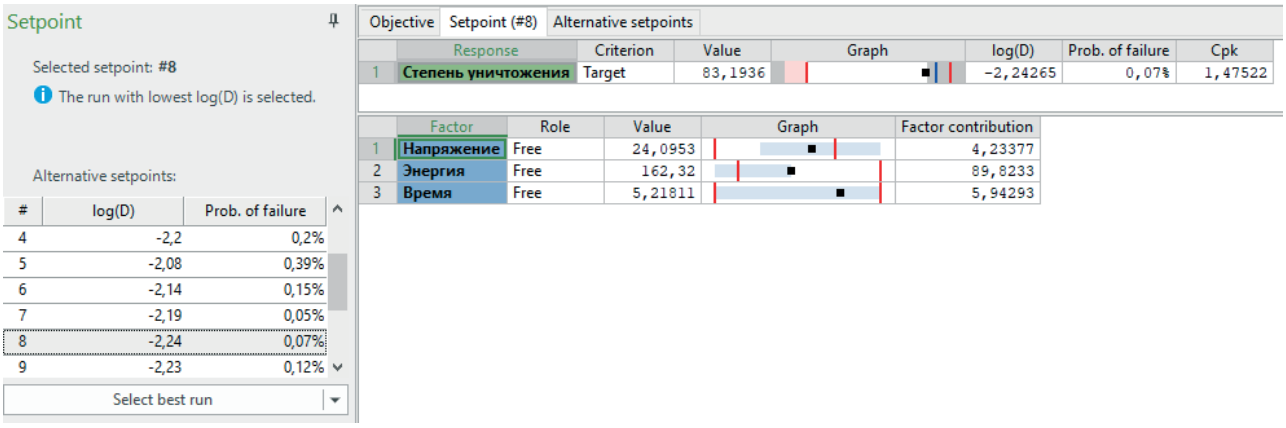
а)



б)

а) трёхмерная поверхность отклика; б) контурная карта изолиний отклика.

Рисунок 2 – Поверхность отклика степени уничтожения сорных растений при электрофизическом воздействии в зависимости от напряжения и энергии



#	log(D)	Prob. of failure
4	-2,2	0,2%
5	-2,08	0,39%
6	-2,14	0,15%
7	-2,19	0,05%
8	-2,24	0,07%
9	-2,23	0,12%

Рисунок 3 – Оптимальные параметры электрофизического воздействия, обеспечивающие достижение целевого значения степени уничтожения сорных растений (по данным регрессионной модели)

мента и анализа поверхности отклика обеспечивает высокую информативность результатов и их практическую применимость.

Во втором эксперименте исследовано влияние времени воздействия разряда (T_a) и разрядного тока (I_a) на степень уничтожения сорных растений при фиксированном значении напряжения *U = 24 кВ*. Эксперимент спланирован и обработан методом отклика поверхности с использованием пакета MODDE, что позволило получить адекватную квадратичную регрессионную модель и выполнить оптимизацию параметров процесса.

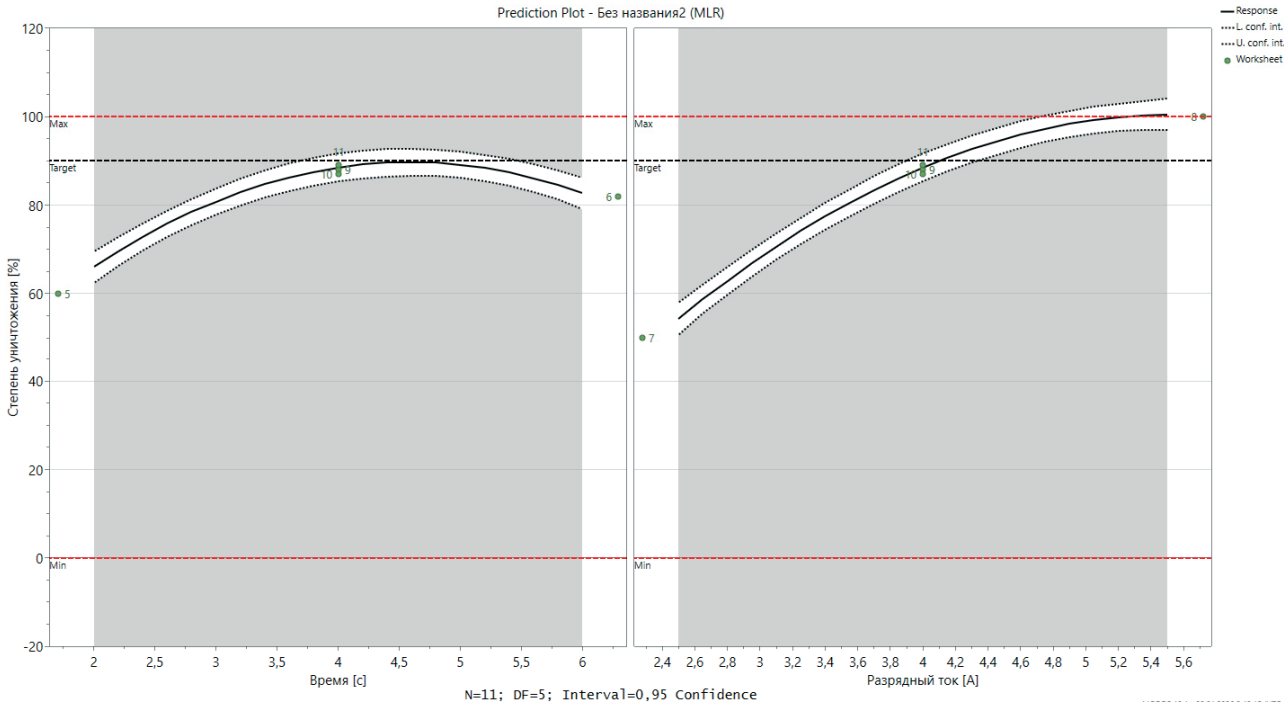
По результатам многофакторного анализа получено следующее уравнение регрессии второго порядка, описывающее зависимость степени уничтожения сорных растений (y), %:

$$y = 88{,}51 + 8{,}33 \cdot T_a + 23{,}12 \cdot I_a - 14{,}16 \cdot T_a^2 - 11{,}12 \cdot I_a^2 + T_a \cdot I_a, \quad (3)$$

где T_a – время воздействия, с; I_a – разрядный ток, А.

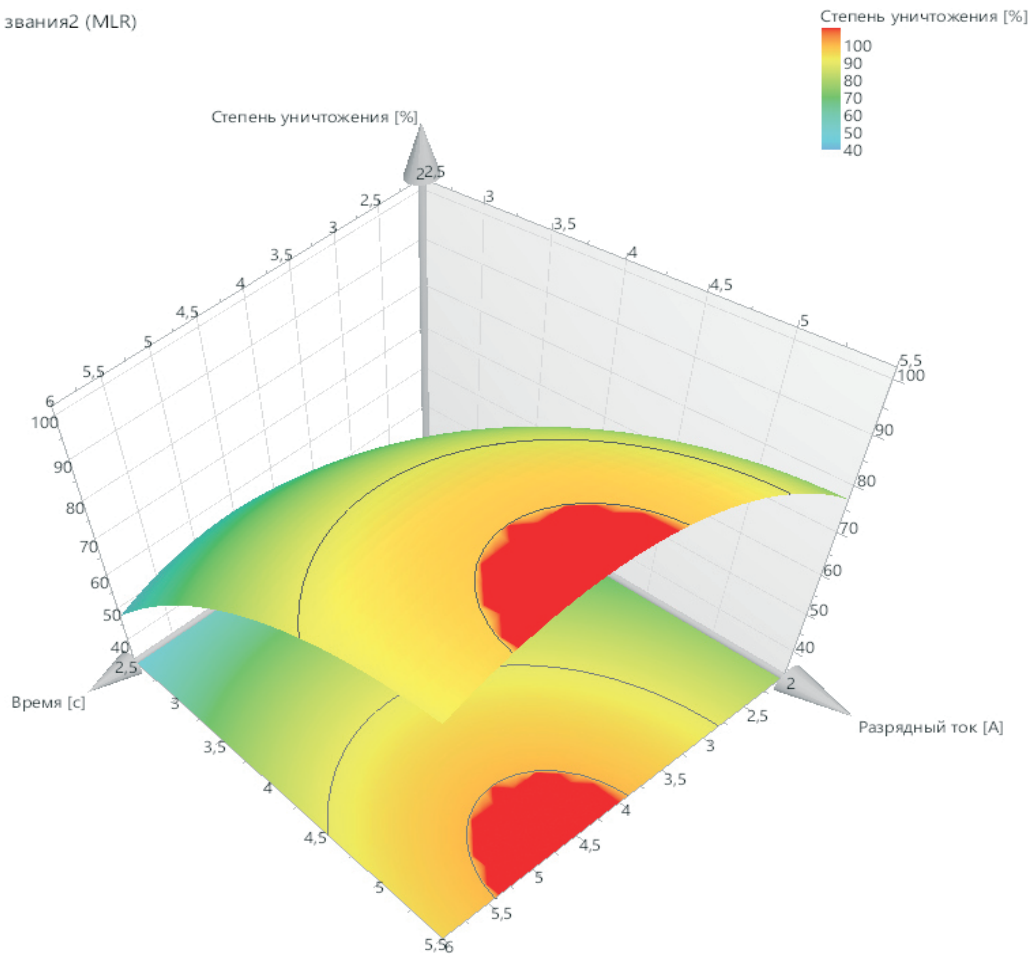
Регрессионные модели (1)–(3) построены в кодированных безразмерных переменных, полученных путём линейного преобразования натуральных значений факторов к интервалу планирования.

Все линейные и квадратичные члены модели статистически значимы при уровне доверия 0,95

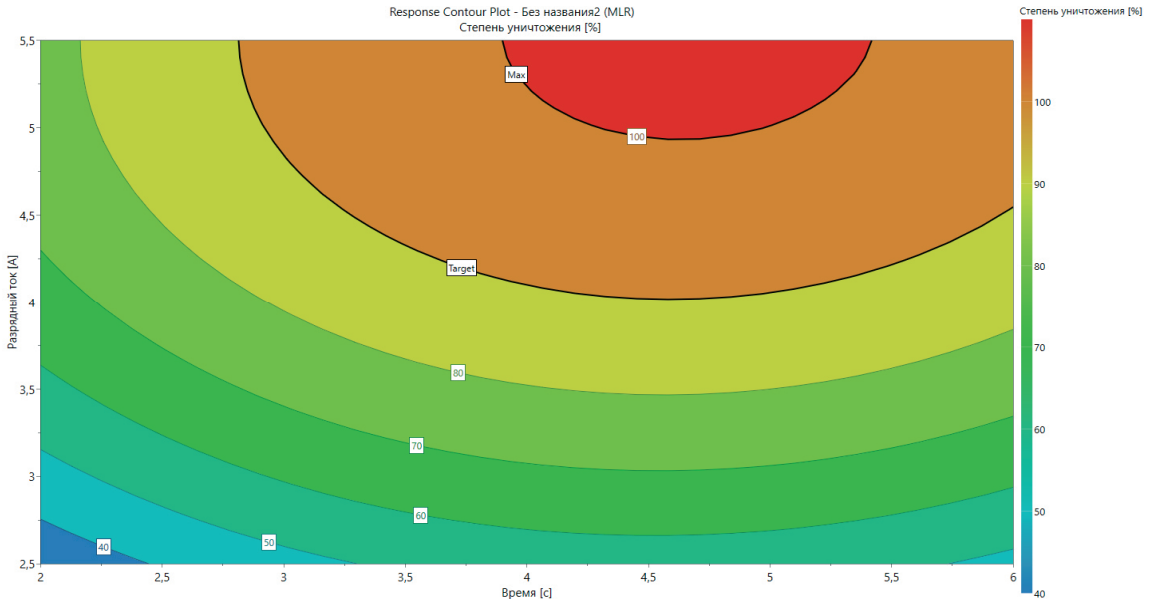


а) б)

Рисунок 4 – Прогнозная зависимость степени уничтожения сорных растений от времени (а) и разрядного тока (б), полученная по данным многофакторной регрессионной модели



а)



б)

а) трёхмерная поверхность отклика; б) контурная карта изолиний отклика.

Рисунок 5 – Поверхность отклика степени уничтожения сорных растений при электрофизическом воздействии в зависимости от времени и разрядного тока

($P < 0,05$), за исключением взаимодействия $T_a \cdot I_a$, влияние которого носит вторичный характер.

Коэффициент детерминации модели составляет $R^2 = 0,995$, а прогностическая способность модели характеризуется высоким значением $Q^2 = 0,964$, что свидетельствует о высокой адекватности и устойчивости полученной модели.

На прогнозном графике зависимости степени уничтожения от времени воздействия (Prediction Plot, рис. 4а) наблюдается выраженный нелинейный характер отклика. При увеличении времени воздействия от 2 до 4–5 секунд степень уничтожения сорных растений возрастает интенсивно, что связано с накоплением электрического воздействия в тканях растения. При дальнейшем увеличении времени рост отклика замедляется, а затем проявляется тенденция к снижению эффективности, что указывает на наличие оптимума процесса и подтверждает значимость отрицательного квадратичного члена (T_a^2) в уравнении регрессии.

Аналогичный характер зависимости выявлен на прогнозном графике влияния разрядного тока (рис. 4б). Увеличение тока от 2,5 до 4,5–5,0 А приводит к резкому росту степени уничтожения сорных растений, достигающему значений 90–100%. При дальнейшем повышении тока наблюдается эффект насыщения, а также снижение прироста эффективности, что соответствует отрицательному квадратичному коэффициенту (I_a^2) и указывает на энергетическую избыточность процесса.

Сопоставление прогнозных зависимостей показывает, что разрядный ток оказывает более выраженное влияние, чем время воздействия, что подтверждается величинами нормализованных коэффициентов регрессии и вкладом факторов в оптимизационном анализе.

Полученная поверхность имеет выраженный куполообразный характер, что подтверждает наличие локального оптимума и согласуется с физическими представлениями о дозированном воздействии импульсного электрического разряда на растительные ткани (рис. 5).

С использованием встроенного оптимизатора MODDE определены рациональные параметры процесса, обеспечивающие достижение целевого значения степени уничтожения:

1) $T_a = 6,07$ с;
2) $I_a = 4,52$ А;
3) $U = 24$ кВ (фиксировано).

Прогнозируемая степень уничтожения: ≈ 89%; вероятность отказа: 0,01%.

Полученные значения подтверждают устойчивость модели и практическую применимость разработанных режимов (рис. 6).

Обсуждения. Построенная в среде MODDE многофакторная регрессионная модель адекватно описывает процесс электрофизического уничтожения сорных растений, что подтверждается высоким значением коэффициента детерминации $R^2 \approx 0,99$. Анализ коэффициентов регрессии показал, что наибольшее влияние на степень уничтожения сорных растений оказывает энергия воздействия, для которой линейный коэффициент составил $b_E = 17,98$.

При увеличении энергии в диапазоне 120–180 Дж наблюдается интенсивный рост степени уничтожения сорных растений, тогда как дальнейшее повышение энергетических затрат приводит к снижению темпа прироста эффективности. Наличие отрицательного квадратичного члена по энергии указывает на эффект энергетического насыщения, при котором дополнительная энергия трансформируется преимущественно в тепловые потери. Аналогичные выводы представлены в биофизических исследованиях, где показано, что после разрушения клеточных мембран и проводящих тканей дальнейшее увеличение энергии не приводит к росту биологического эффекта [13].

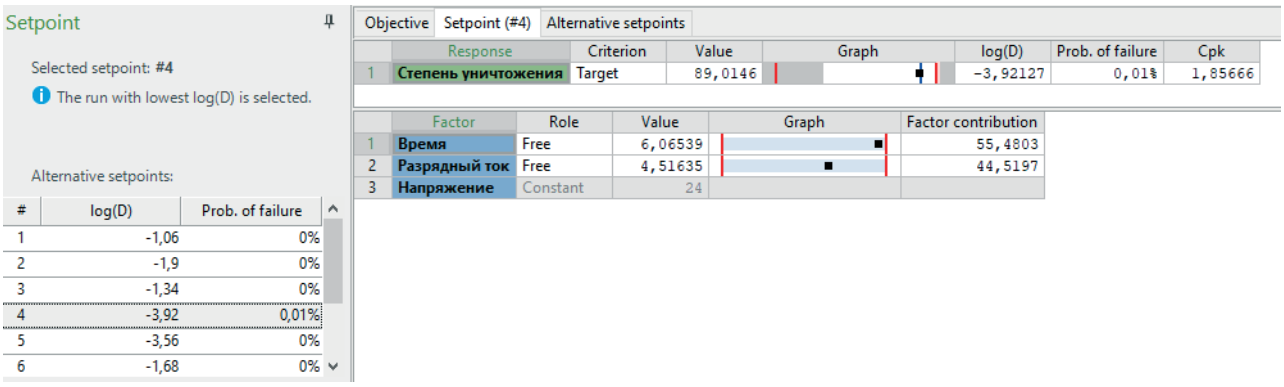


Рисунок 6 – Оптимальные параметры электрофизического воздействия, обеспечивающие достижение целевого значения степени уничтожения сорных растений (по данным регрессионной модели)

Зависимость степени уничтожения от напряжения носит пороговый характер. В диапазоне 15–18 кВ рост эффективности незначителен, тогда как при увеличении напряжения до 18–22 кВ степень уничтожения возрастает более чем на 20 процентных пунктов. При напряжениях выше 22–23 кВ наблюдается замедление прироста отклика, что согласуется с данными обзорных исследований по электрическому уничтожению сорных растений, опубликованных в статье автора [9].

Выводы.

1. Установлен нелинейный характер влияния параметров электрофизического воздействия на степень уничтожения сорных растений.

2. Построенные квадратичные регрессионные модели обладают высокой адекватностью (R^2 – до 0,995) и могут быть использованы для анализа и прогнозирования процесса.

3. Оптимальные параметры, обеспечивающие устойчивую эффективность процесса, составляют: при оптимизации по U, E и T_a – степень уничтожения ≈ 83%, вероятность отказа ≤ 0,1%; при фиксированном U = 24 кВ: T_a = 6,07 с, I_a = 4,52 А, прогнозируемая степень уничтожения ≈ 89%, вероятность отказа 0,01%.

4. Использование программы MODDE доказало свою эффективность при анализе и оптимизации электрофизических процессов и обладает высокой практической значимостью.

Список источников

1. Nowosad K., Sujka M., Pankiewicz U., Kowalski R. The application of PEF technology in food processing and human nutrition // Journal of Food Science and Technology. 2021. Vol. 58, № 2. P. 397–411. DOI 10.1007/s13197-020-04512-4.

2. Vorobiev E., Lebovka N. I. Pulsed electric field in green processing and preservation of food products // Green Food Processing Techniques. 2019. P. 403–430. DOI 10.1016/B978-0-12-815353-6.00015-X.

3. Diprose M. F., Benson F. A., Hackam R. Electrothermal control of weed beet and bolting sugar beet // Weed Research. 1980. Vol. 20, Is. 5. DOI 10.1111/j.1365-3180.1980.tb01625.x.

4. Vigneault C., Benoît D. L. Electrical Weed Control: Theory and Applications / Vincent C., Panneton B., Fleurat-Lessard F. (eds.) // Physical Control Methods in Plant Protection. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2001. P. 174–188. DOI 10.1007/978-3-662-04584-8_12.

5. Demir E., Tappi S., Dymek K. [et al.] Reversible electroporation caused by pulsed electric field – opportunities and challenges for the food sector // Trends in Food Science & Technology. 2023. Vol. 139. Art. 104120. DOI 10.1016/j.tifs.2023.104120.

6. Kotnik T., Frey W., Sack M. [et al.] Electroporation-based applications in biotechnology // Trends in Biotechnology. 2015. Vol. 33, Is. 8. P. 480–488. DOI 10.1016/j.tibtech.2015.06.002.

7. Schreier H., Bish M., Bradley K. W. The impact of electrocution treatments on weed control and weed seed viability in soybean // Weed Technology. 2022. Vol. 36, Is. 4. P. 481–489. DOI 10.1017/wet.2022.56.

8. Matsuda Y., Kakutani K., Toyoda H. Unattended electric weeder (UEW): a novel approach to control floor weeds in orchard nurseries // Agronomy. 2023. Vol. 13, № 7. Art. 1954. DOI 10.3390/agronomy13071954.

9. Slaven M. J., Koch M., Borger C. P. D. Exploring the potential of electric weed control: a review // Weed Science. 2023. Vol. 71, Is. 5. P. 403–421. DOI 10.1017/wsc.2023.38.

10. Ramaswamy R., Bala Krishnan S. Pulsed electric field treatment in extracting proteins from legumes: a review // Processes. 2024. Vol. 12, № 12. DOI 10.3390/pr12122667.

11. Угловский А. С., Семеренко Н. Ю. Оптимизация процесса удаления сорных растений с использованием высоковольтного напряжения в многофакторном эксперименте // Вестник АПК Верхневолжья. 2025. № 2 (70). С. 72–77. DOI 10.35694/YARCX.2025.70.2.011. EDN NWWFUU.

12. Угловский А. С. Экспериментальное исследование и моделирование изменения импеданса биологических объектов на примере сорных растений при воздействии высоковольтных импульсов // Вестник АПК Верхневолжья. 2025. № 4 (72). С. 160–166. DOI 10.35694/YARCX.2025.72.4.023. EDN VTJOHU.

13. Martinsen O. G., Heiskanen A. Bioimpedance and bioelectricity basics : textbook. 4th ed. London : Academic Press, 2023. 520 p. ISBN 978-0-12-819107-1.

References

1. Nowosad K., Sujka M., Pankiewicz U., Kowalski R. The application of PEF technology in food processing and human nutrition // Journal of Food Science and Technology. 2021. Vol. 58, № 2. P. 397–411. DOI 10.1007/s13197-020-04512-4.

2. Vorobiev E., Lebovka N. I. Pulsed electric field in green processing and preservation of food products // Green Food Processing Techniques. 2019. P. 403–430. DOI 10.1016/B978-0-12-815353-6.00015-X.

3. Diprose M. F., Benson F. A., Hackam R. Electrothermal control of weed beet and bolting sugar beet // Weed Research. 1980. Vol. 20, Is. 5. DOI 10.1111/j.1365-3180.1980.tb01625.x.

4. Vigneault C., Benoît D. L. Electrical Weed Control: Theory and Applications / Vincent C., Panneton B., Fleurat-Lessard F. (eds.) // Physical Control Methods in Plant Protection. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2001. P. 174–188. DOI 10.1007/978-3-662-04584-8_12.

5. Demir E., Tappi S., Dymek K. [et al.] Reversible electroporation caused by pulsed electric field – opportunities and challenges for the food sector // Trends in Food Science & Technology. 2023. Vol. 139. Art. 104120. DOI 10.1016/j.tifs.2023.104120.

6. Kotnik T., Frey W., Sack M. [et al.] Electroporation-based applications in biotechnology // Trends in Biotechnology. 2015. Vol. 33, Is. 8. P. 480–488. DOI 10.1016/j.tibtech.2015.06.002.

7. Schreier H., Bish M., Bradley K. W. The impact of electrocution treatments on weed control and weed seed viability in soybean // Weed Technology. 2022. Vol. 36, Is. 4. P. 481–489. DOI 10.1017/wet.2022.56.

8. Matsuda Y., Kakutani K., Toyoda H. Unattended electric weeder (UEW): a novel approach to control floor weeds in orchard nurseries // Agronomy. 2023. Vol. 13, № 7. Art. 1954. DOI 10.3390/agronomy13071954.

9. Slaven M. J., Koch M., Borger C. P. D. Exploring the potential of electric weed control: a review // Weed Science. 2023. Vol. 71, Is. 5. P. 403–421. DOI 10.1017/wsc.2023.38.

10. Ramaswamy R., Bala Krishnan S. Pulsed electric field treatment in extracting proteins from legumes: a review // Processes. 2024. Vol. 12, № 12. DOI 10.3390/pr12122667.

11. Uglovskij A. S., Semerenko N. Yu. Optimizaciya processa udaleniya sornyh rastenij s ispol'zovaniem vysokovol'tnogo napryazheniya v mnogofaktornom eksperimente // Vestnik APK Verhnevolzh'ya. 2025. № 2 (70). S. 72–77. DOI 10.35694/YARCX.2025.70.2.011. EDN NWWFUU.

12. Uglovskij A. S. Eksperimental'noe issledovanie i modelirovanie izmeneniya impedansa biologicheskih ob"ektov na primere sornyh rastenij pri vozdejstvii vysokovol'tnyh impul'sov // Vestnik APK Verhnevolzh'ya. 2025. № 4 (72). S. 160–166. DOI 10.35694/YARCX.2025.72.4.023. EDN VTJOHU.

13. Martinsen O. G., Heiskanen A. Bioimpedance and bioelectricity basics : textbook. 4th ed. London : Academic Press, 2023. 520 p. ISBN 978-0-12-819107-1.

Сведения об авторе

Артем Сергеевич Угловский – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электрификации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный аграрный университет», spin-код: 3717-5731.

Information about the author

Artem S. Uglovskiy – Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Electrification, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslavl State Agrarian University", spin-code: 3717-5731.