

Научная статья
 УДК 621.3.027.6:632.51
 doi:10.35694/YARCX.2025.72.4.022

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

**Виктор Григорьевич Ляпин¹, Владимир Ильич Загинайлов²,
 Сергей Андреевич Андреев³**

^{1, 2, 3}Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева,
 Москва, Россия

¹lei1300@mail.ru, ORCID 0000-0002-5270-7783

²energo-viz@mail.ru, ORCID 0000-0002-2623-760X

³energo-andreev@rgau-msha.ru, ORCID 0000-0002-8945-963X

Реферат. Энергоэффективные режимы электротехнологической обработки растительных объектов во многом зависят от их электрофизических свойств. В соответствии с поставленной целью разработаны и представлены схематические, математические и численные модели растительных объектов, позволяющие изучать электрофизические свойства биологической среды, подвергающейся воздействию электрической энергии и параметров окружающей среды. Предложен цепно-полевой подход к моделированию, включающий комплексное описание электрофизических свойств биологических систем с использованием теории электрических цепей и электромагнитного поля. Полученные результаты раскрывают механизм исследуемого подхода и могут быть использованы при проектировании оборудования для электрофизического поражения нежелательной растительности. С использованием законов Кирхгофа составлена и проанализирована система из 12 алгебраических уравнений, описывающая взаимосвязь электрофизических параметров биосреды в виде объёмной кубической решётки, позволяющая определять величину сопротивлений электропроводящих рёбер решетки при локальном выделении заданной активной мощности при воздействии на биологические среды. Установлено, что основными преимуществами электротехнологического способа уничтожения нежелательной растительности является его безынерционность, высокий КПД и избирательность воздействия по отношению к различным биологическим объектам. Оптимизация электрического повреждения растительных объектов достигается варьированием дозы вводимой энергии, интенсивности и частоты электромагнитного поля вне и внутри растительной ткани с учётом параметров окружающей среды. Полученные модели позволяют получить новые знания по механизму воздействия электрической энергии на биологические объекты, разрабатывать энергоэффективные способы электротехнологического уничтожения нежелательной растительности, разрабатывать устройства для их реализации и обосновать оптимальные режимы обработки растительных объектов.

Ключевые слова: электротехнологическая обработка, биологические среды, электрофизические свойства, растительные объекты, импеданс, электрическое повреждение, схематическое моделирование, математическое моделирование, численное моделирование

MODELING THE ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF PLANT OBJECTS UNDER ELECTROTECHNOLOGICAL IMPACT

Viktor G. Lyapin¹, Vladimir I. Zaginaylov², Sergey A. Andreev³

^{1, 2, 3}Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
 Moscow, Russia

¹lei1300@mail.ru, ORCID 0000-0002-5270-7783

²energo-viz@mail.ru, ORCID 0000-0002-2623-760X

³energo-andreev@rgau-msha.ru, ORCID 0000-0002-8945-963X

Abstract. Energy-efficient modes of electrotechnological processing of plant objects largely depend on their electrophysical properties. In accordance with the set goal, schematic, mathematical and numerical models of plant objects have been developed and presented, which make it possible to study the electrophysical properties of a biological environment exposed to electrical energy and environmental parameters. A circuit-field approach to modeling including a comprehensive description of the electrophysical properties of biological systems using the theory of electrical circuits and an electromagnetic field has been proposed. The obtained results reveal the mechanism of the approach under investigation and can be used in the design of equipment for electrophysical destruction to unwanted vegetation. Using Kirchhoff's laws, a system of 12 algebraic equations was compiled and analyzed, describing the relationship between the electrophysical parameters of the biological environment in the form of a volumetric cubic lattice, which makes it possible to determine

the resistance value of the electrically conductive edges of the lattice with local release of a given active power when effecting on biological environments. It has been established that the main advantages of the electrotechnological method of destroying unwanted vegetation are its inertialess nature, high efficiency and selectivity of impact in relation to various biological objects. Optimization of electrical damage to plant objects is achieved by varying the dose of introduced energy, the intensity and frequency of the electromagnetic field outside and inside the plant tissue, taking into account environmental parameters. The obtained models make it possible to obtain new knowledge on the mechanism of the impact of electric energy on biological objects, to develop energy-efficient methods of electrotechnological destruction of unwanted vegetation, to develop devices for their implementation and to substantiate optimal processing modes for plant objects.

Keywords: *electrotechnological processing, biological environments, electrophysical properties, plant objects, impedance, electrical damage, circuit simulation, mathematic simulation, numerical simulation*

Введение. Обоснование энергоэффективных режимов электротехнологической обработки (ЭТО) растительных объектов (РО) осуществляется с учётом их электрофизических свойств, характеристики которых варьируются в широких пределах и зависят от параметров электротехнологического процесса (ЭТП) и электрофизических параметров РО [1–5]. Для моделирования импедансных свойств биологических сред используют эквивалентные схемы – комбинации омического сопротивления и ёмкости, которые в первом приближении моделируют электрические параметры исследуемого РО. Моделирование биоимпедансных цепей – эффективное решение, используемое в биологии, медицине, ветеринарии, защите растений для интерпретации измеренного импеданса. Поэтому в мировом АПК растёт популярность неинвазивных методов измерения биоимпеданса – комплексного электрического сопротивления биоткани, изменения которого отражают скрытые биохимические и биофизические процессы в живых и неживых тканях [6–10]. В данной статье предлагаются новые аналитические и численные модели биоимпеданса на примере стебля РО.

Растительная ткань (РТ) представляет собой сложную систему, в её состав входят разнородные биологические элементы: образовательные, основные, покровные, проводящие, механические, запасующие, выделительные. В зависимости от окружающих условий она имеет различные геометрические размеры клеток, морфологию, содержание и соотношение основных химических элементов, соответственно, и численные оценки импеданса. Кроме того, РТ являются неоднородными средами, поглощающими энергию электромагнитного излучения (ЭМИ) [10] с показателем преломления большим, чем у воздуха. Для оценки поглощения биоткани ЭМИ можно воспользоваться моделью распространения электромагнитного поля (ЭМП) в рассеивающей среде. Математическая и численная реализация такой модели позволяет планировать эксперименты и упростить интерпретацию результатов.

Цель исследования – разработать и представить схематические, аналитические математические и численные модели электрофизических свойств растительных объектов, используемые при проектировании электротехнологических установок по уничтожению нежелательной растительности.

Материалы и методы исследований. Соответствующая математическая модель должна отражать

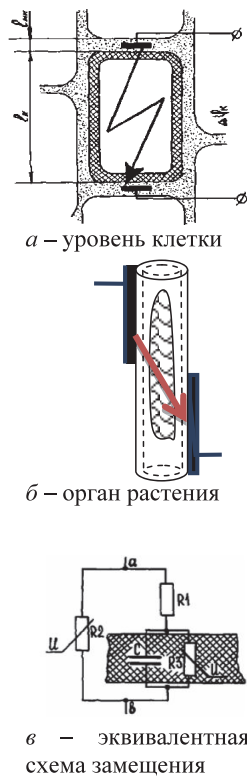
особенности строения РТ: наличие слоёв (различающихся по составу входящей в них ткани, а также по объёму или толщине); присутствие в ней электропроводящей системы, а также наличие защитной среды на поверхности РО. Помимо этой развитой модели, включающей источник ЭМИ в теории поля или технологического напряжения U_r в теории цепей, каждый слой РТ обладает собственным набором поглощающих, рассеивающих свойств и особенностей взаимодействия с ЭМИ. На первой стадии исследований сложная математическая модель была упрощена, т.е. рассматривалось приближение: объёмные слои РТ (локальные области биосреды), отсутствие образовательных и выделительных биологических элементов.

В рамках упрощённых моделей невозможно рассчитывать на удовлетворительную точность численных оценок импеданса индивидуальных РТ. В теории цепей импеданс является сложным объектом для теоретического анализа. Нарушение барьерной функции мембраны лежит в основе электрического повреждения растительных объектов (ЭПРО) – клетки [6]. Структурными элементами стебля, корня, клубня, луковицы, листа, лепестка, плода и др. отдельных органов растения являются защитные оболочки и внутренние ткани (рис. 1).

Различные процессы в ЭМП с РТ, сопровождающиеся необратимыми потерями энергии ЭМИ, дают вклад в величину активной составляющей R_{PO} импеданса РО $Z_{PO} = R_{PO} - jX_{PO}$. Различия в структурах РТ предопределяет отличие эпидермиса и внутренних тканей по величине удельного электрического сопротивления ($УЭС$) ткани ρ_r и их устойчивости к ЭПРО. В процессе развития растительного организма структура РТ из проводников второго рода переходит в диэлектрический материал.

Так как ЭПРО в ЭМП происходит за счёт поляризации и тока проводимости [1; 10], а совокупность этих процессов приводит к поглощению РО энергии ЭМП, то для проектирования элементной базы источника электрической энергии (ИЭЭ), электропреобразователя (ЭП) и электродной системы (ЭС) мобильных электротехнологических установок (ЭТУ) достаточно учитывать макроскопические свойства РО (описываемые с помощью классической физики) и сформированные нами основные параметры установок ЭПРО (табл. 1).

При расчёте ЭС определяют их геометрические параметры, обеспечивающие выделение в РО заданной мощности и исключающих возникновение ненормальных режимов. Нами показано [2], что электрическое



Вид функции ЭПРО на уровнях клетки, ткани, органа

На уровне клетки $R_1 \ll R_3$ сквозной пробой структурного элемента обеспечивается при разности потенциалов $U_{нк} = 2\kappa \cdot U_{нм}$, где 2 – множитель, связанный с условием пробоя мембраны в двух местах; $U_{нм}$ – среднее значение напряжения, вызывающее пробой мембраны; κ – коэффициент, учитывающий увеличение $U_{нк}$ за счёт падения напряжения на внутренние содержимые клетки (из схемы замещения $\kappa = 1 + ((1 + 2\pi \cdot f \cdot CR_3) \cdot R_1/R_3)$).

При $f = 0$, $\kappa = 1 + R_1/R_3$ и $U_{нк} = 2(1 + R_1/R_3) \cdot U_{нм} = \min$.

Для клеток ткани, например, стебля люцерны $R_1 = 4,16$ кОм, $R_3 = 320$ кОм, $\kappa = 1,01$.

Напряжённость поля, при превышении которой наступает сквозной пробой клетки $E_{нк} = 2\kappa \cdot U_{нм}/l_k$, где l_k – расстоянием между точками пробоя мембраны в двух местах.

Пробой n -го количества ориентированных в одном направлении РТ достигается при разности потенциалов:

$U_{нт} = 2n \cdot \kappa_1 \cdot U_{нм} = 2\kappa_1 \cdot U_{нм} \cdot l/(l_k + l_{мк})$, где κ_1 – коэффициент, учитывающий увеличение $U_{нт}$ за счёт падений напряжения на внутреннем содержимом клетки и межклетнике, находящемся в зазоре между мембранами соседних клеток, расположенных друг за другом; $l_{мк}$ – зазор между мембранами соседних клеток; $l = n \cdot (l_k + l_{мк})$ – длина ткани, включённой в электрическую цепь, $n = l / (l_k + l_{мк})$.

Напряжённость поля, при сквозном пробое n клеток: $E_{нт} = 2\kappa_1 \cdot U_{нм}/(l_k + l_{мк})$.

Для РТ сердцевины: $l_k \gg l_{мк}$, $R_3 \gg R_2 > R_1$, $E_{нт}$ вдоль $\ll E_{нт}$ поперёк. Для проводящей РТ: $l_{мк} = 0$, $\kappa_1 = \kappa$, $E_{нт} = 2\kappa_1 \cdot U_{нм}/l_k$, $E_{нт}$ вдоль $\ll E_{нт}$ поперёк.

Для защитной оболочки органов растения: $l_{мк} \gg l_k$, $R_2 > R_3$, $\kappa_1 > 2$, $E_{нт}$ защ $\gg E_{нт}$ внутр.

Рисунок 1 – К электрическому повреждению структурных элементов РО: геометрия задач сквозного пробоя клетки a и защитных оболочек с внутренними тканями стебля b (— электроды в межклеточном пространстве a , на поверхности стебля b); b – эквивалентная электрическая схема замещения РО (R_1, R_2 – сопротивления внутренних тканей стебля b , содержимого клетки b , межклеточной жидкости b , межклетника b , R_3 и C – сопротивление и ёмкость защитной оболочки стебля b и мембраны клетки b)

Таблица 1 – Основные параметры мобильных ЭТУ ЭПРО

Наименование	Обозначение	Размерность
Ширина захвата	B	м
Установленная мощность источника электрической энергии	$S_{ИЭЭ}$	кВА
Установленная и используемая мощности электропреобразователя	$S_{ЭП}$ и $S_{ЭПн}$	кВА
Электротехнологическое (рабочее) напряжение	U_{τ}	кВ
Сила тока электрода	I_{τ}	А
Конфигурация и износ электродов	$d_{\tau}, b_{\tau}, h_{\tau}$ и y_{τ}	мм
Коэффициент мощности	$\cos \phi$	х
Электрический КПД	η_{τ}	х
Активное и реактивное сопротивления:		
– цепи, состоящей из электропреобразователя и электродов	r_c и x_c	МОм
– электродной системы	$r_{\tau c}$ и $x_{\tau c}$	кОм
– блока управления, сигнализации и защиты	$r_{\tau y}$ и $x_{\tau y}$	Ом
Расход электроэнергии	$W_{y\tau}$	кВт·ч/га
Производительность	τ_{τ}	га/ч
Электротехнологический критерий (повреждение растений)	K_{τ}	%

сопротивление между электродом и почвой Z_{τ} (табл. 2) зависит от формы и геометрических размеров электрода, его местоположения относительно поверхности по-

чвы, сопротивления РТ и почвы электрическому току. Увеличение площади контакта электрода с почвой, его углубление приводят к снижению Z_{τ} .

Таблица 2 – Геометрия и сопротивление системы «электрод–почва»

Форма	Геометрия	Вид функции сопротивления
Полоса в почве		$R_{эл} = \rho_n \ln(2b^2/\delta h)/2\pi \cdot b,$ где ρ_n – удельное сопротивление почвы; $b = b_1 + b_2$ – общая длина кромки; δ – средняя ширина полосы; h – глубина залегания (хода) полосы в почве
Полоса на поверхности почвы		При $h = 0$ $R_{эл} = \rho_n \ln(4b/\delta)/\pi \cdot b$
Каток на поверхности почвы		При $\phi = \pi$ $R_{эл} = \rho_n \ln(2b/d_k)/\pi b,$ где d_k – диаметр катка. При $\phi \ll \pi$, $R_{эл} = \rho_n \ln(4b/\delta)/\pi \cdot b$, где $\delta = d_k \phi/2$; ϕ – центральный угол в радианах
Полоса над поверхностью почвы ¹		$\frac{1}{Z_{эл}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_{pi}}$ где n – число растений (ветвей) в цепи «электрод–почва»; Z_{pi} – сопротивление i -го растения в системе «электрод–почва» $\{Z_{pi} = Z_{pkci} + Z_{cti} : Z_{pkci}$ – сопротивление ткани корневой системы i -го растения; $Z_{cti} = 4z_r \cdot l_{cti} / \pi \cdot d_{cti}^2$ – сопротивление стебля i -го растения в цепи «электрод–почва» (z_r – удельное сопротивление ткани; l_{cti} – длина стебля i -го растения в цепи «электрод–почва»; d_{cti} – диаметр ткани стебля i -го растения)}. При $Z_{pkci} \cdot d_{cti} \cdot h = \text{const}$ и $n = b \cdot \delta \cdot z_c \cdot Z_{эл} = (Z_{pkc} + 4z_r \cdot h / \pi \cdot d_{ct}^2) \cdot l_{ct} / b \cdot \delta \cdot z_c$, где z_c – засорённость. При $h = 0$, $R_{эл} = R_{pkc} / b \cdot \delta \cdot z_c$

¹ При $Z_r = \rho_r \cdot Z_{эс} = R_{эс} \cdot Z_{эл} = R_{эл} \cdot Z_{pi} = R_{pi}$, $Z_{pkci} = R_{pkci}$, $Z_{cti} = R_{cti}$, $R_{cti} = 4\rho_r \cdot l_{cti} / \pi \cdot d_{cti}^2$.

Общую мощность трёхфазной ЭС мобильной ЭТУ при соединении нагрузки треугольником S_{Δ} (рис. 2) или звездой S_Y (рис. 3) можно рассчитать по формулам: $S_{\Delta} = 3U_n^2 / (z_{\phi} + 2z_3)$, или $S_{\Delta} = \sqrt{3}U_n^2 / (z_{\phi} + z_3)$ [2], где U_n – линейное выходное напряжение ЭП или ИЭЭ. Для практических задач анализа ЭМП некоторыми величинами можно пренебречь и в теории цепей рассматривать РО как активно-ёмкостное сопротивление (рис. 3). При заданном U_n , т.е. напряжении между электродами U_n ,

мощность ЭС ЭТУ определяется сопротивлением фазы z_{ϕ} , которое представляет собой комплексное сопротивление биосреды и приэлектродного пространства между электродами, образующими фазу, а также сопротивление электрода z_3 .

В соответствии с рисунком 3 при активно-реактивной нагрузке $Z_{МЭП}$ дифференциальные уравнения по методу контурных токов имеют вид:

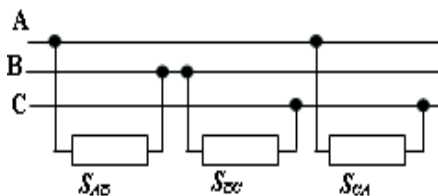


Рисунок 2 – Схема включения нагрузки ЭТУ (S_{AB} , S_{BC} , S_{CA} – приэлектродное пространство, почва, ткани наземной и корневой систем растений) на линейные напряжения

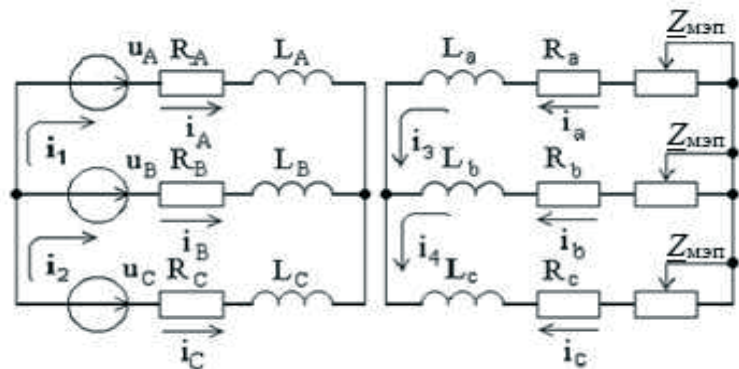


Рисунок 3 – Схема распределения токов ЭТУ в электрооборудовании и межэлектродных промежутках (МЭП)

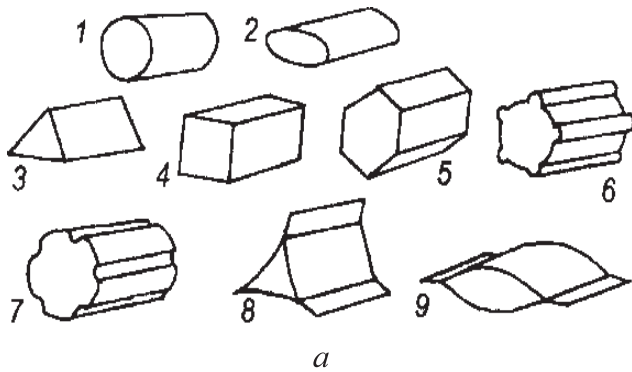
$$\left. \begin{aligned} u_{AB} &= (R_A + R_B)i_1 - R_B i_2 + d\psi_1 / dt \\ u_{BC} &= (R_B + R_C)i_2 - R_B i_1 + d\psi_2 / dt \\ 0 &= (R_a + R_b + 2Z_{МЭП})i_3 - (R_b + Z_{МЭП})i_4 + d\psi_3 / dt \\ 0 &= (R_b + R_c + 2Z_{МЭП})i_4 - (R_b + Z_{МЭП})i_3 + d\psi_4 / dt \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где u_{AB}, u_{BC} – мгновенные значения линейных напряжений; $i_1 - i_4$ – токи контуров, причём $i_1 = i_a, i_2 = -i_c, i_3 = i_a, i_4 = -i_c$; R_A, R_B, R_C и R_a, R_b, R_c – активные сопротивления фаз первичной и вторичной обмоток трансформатора; $\psi_1 - \psi_4$ – результирующие потокоцепления контуров; $Z_{МЭП}$ – сопротивление МЭП (при чисто активной нагрузке $Z_{МЭП} = R_{МЭП}$).

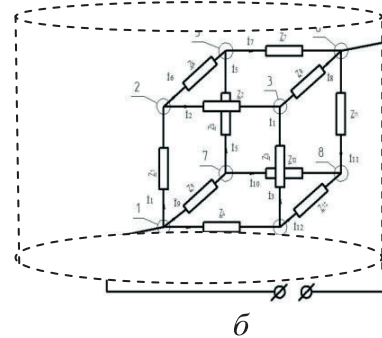
Результаты и их обсуждение. При решении вопроса энергоэффективности ЭТО необходимо оценить структурно-функциональное состояние РО, что является

ключевым этапом перед ЭТП ЭПРО. Простым схемотехническим решением эффективности, обеспечивающим решение задачи равномерности ЭПРО, оказалось использование токопроводящей объёмной решётки, размещённой внутри локального пространства РТ стебля или корня (рис. 4).

На поперечном разрезе стебли бывают округлые, сплюснутые, трёхгранные и др. Цилиндрический, внутри в междоузлиях полый, стебель называется соломиной (у злаковых) (рис. 4а).



Поперечные сечения стеблей:
1 – округлое; 2 – сплюснутое; 3 – 3-гранное;
4 – 4-гранное; 5 – многогранное; 6 – ребристое;
7 – бороздчатое; 8, 9 – крылатое



Эквивалентная схема РТ во внутреннем пространстве стебля

Рисунок 4 – Пример размещения объёмной токопроводящей эквивалентной схемы замещения РТ во внутреннем пространстве стебля или корня

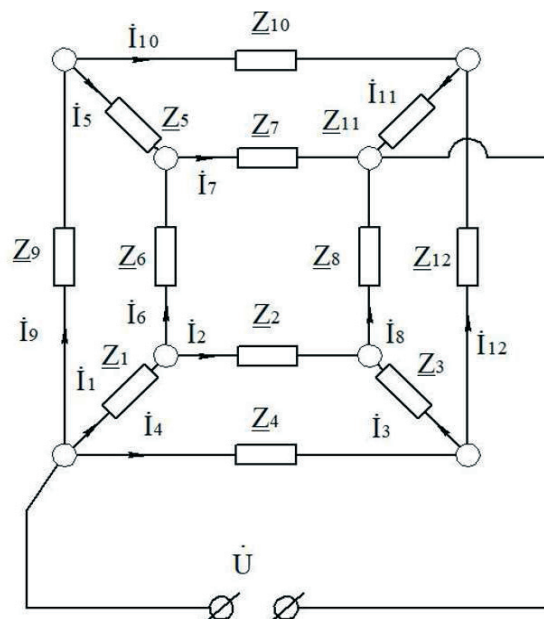


Рисунок 5 – Принципиальная электрическая схема РТ на плоскости

При этом форма решётки может совпадать с формой РО, в нашем случае поперечного сечения стеблей (рис. 4а), или приближаться к ней. Пример формы такой решётки в виде набора параллелепипедов представлен на рис. 4б и решён в нашей работе [11] при электропитании этой объёмной кубической решётки от источника постоянного напряжения. Обозначив токи, протекающие по комплексным сопротивлениям $Z_1 \dots Z_{12}$, символами $\dot{I}_1 \dots \dot{I}_{12}$, соответственно, выберем направления токов и отметим их стрелками, как показано на рисунке 5.

В таком случае для каждой вершины куба по первому закону Кирхгофа можно записать:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 + \dot{I}_9 + \dot{I}_4 - \dot{I} = 0 \\ \dot{I}_1 - \dot{I}_6 - \dot{I}_2 = 0 \\ \dot{I}_2 + \dot{I}_3 - \dot{I}_8 = 0 \\ \dot{I}_4 - \dot{I}_3 - \dot{I}_{12} = 0 \\ \dot{I}_6 + \dot{I}_5 - \dot{I}_7 = 0 \\ \dot{I}_7 + \dot{I}_8 + \dot{I}_{11} - \dot{I} = 0 \\ \dot{I}_9 - \dot{I}_5 - \dot{I}_{10} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Сформируем уравнения по второму закону Кирхгофа для внутренних и внешних контуров:

$$\begin{cases} \dot{I}_9 Z_9 + \dot{I}_5 Z_5 - \dot{I}_6 Z_6 - \dot{I}_1 Z_1 = 0 \\ \dot{I}_{10} Z_{10} + \dot{I}_{11} Z_{11} - \dot{I}_7 Z_7 - \dot{I}_5 Z_5 = 0 \\ \dot{I}_8 Z_8 - \dot{I}_{11} Z_{11} - \dot{I}_{12} Z_{12} + \dot{I}_3 Z_3 = 0 \\ \dot{I}_1 Z_1 + \dot{I}_2 Z_2 + \dot{I}_8 Z_8 = \dot{U} \\ \dot{I}_4 Z_4 + \dot{I}_3 Z_3 + \dot{I}_8 Z_8 = \dot{U} \end{cases} \quad (3)$$

Вследствие симметрии электрической цепи можно отметить, что ряд токов равны между собой: $\dot{I}_1 = \dot{I}_9 = \dot{I}_4 = \dot{I}_7 = \dot{I}_8 = \dot{I}_{11}$, $\dot{I}_6 = \dot{I}_{12} = \dot{I}_2 = \dot{I}_{10}$, $\dot{I}_5 = \dot{I}_3$. Введём обозначения: $\dot{I}_1 = \dot{I}_a$; $\dot{I}_6 = \dot{I}_b$; $\dot{I}_5 = \dot{I}_c$. Аналогично обозначим сопротивления проводников, образующих рёбра куба: $Z_1 = Z_a$, $Z_6 = Z_b$, $Z_5 = Z_c$. С учётом этих обозначений систему уравнений (2, 3) сведём к виду:

$$\begin{cases} \dot{I}_a + \dot{I}_a + \dot{I}_a - \dot{I} = 0 \\ \dot{I}_a - \dot{I}_b - \dot{I}_b = 0 \\ \dot{I}_b + \dot{I}_c - \dot{I}_a = 0 \\ \dot{I}_a - \dot{I}_c - \dot{I}_b = 0 \\ \dot{I}_b + \dot{I}_c - \dot{I}_a = 0 \\ \dot{I}_b + \dot{I}_c - \dot{I}_a = 0 \\ \dot{I}_a + \dot{I}_a + \dot{I}_a - \dot{I} = 0 \\ \dot{I}_a - \dot{I}_c - \dot{I}_b = 0 \\ \dot{I}_a Z_a + \dot{I}_c Z_c - \dot{I}_b Z_b - \dot{I}_a Z_a = 0 \\ \dot{I}_b Z_b + \dot{I}_a Z_a - \dot{I}_a Z_a - \dot{I}_c Z_c = 0 \\ \dot{I}_a Z_a - \dot{I}_a Z_a - \dot{I}_b Z_b + \dot{I}_c Z_c = 0 \\ \dot{I}_a Z_a + \dot{I}_b Z_b + \dot{I}_a Z_a = \dot{U} \\ \dot{I}_a Z_a + \dot{I}_c Z_c + \dot{I}_a Z_a = \dot{U} \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} 3\dot{I}_a - \dot{I} = 0 \\ \dot{I}_a - 2\dot{I}_b = 0 \\ \dot{I}_b + \dot{I}_c - \dot{I}_a = 0 \\ \dot{I}_c Z_c - \dot{I}_b Z_b = 0 \\ 2\dot{I}_a Z_a + \dot{I}_b Z_b = \dot{U} \\ 2\dot{I}_a Z_a + \dot{I}_c Z_c = \dot{U} \end{cases}$$

Таким образом, по элементам РТ в форме решётчатого куба протекают три различных тока:

$$\begin{aligned} \dot{I}_a &= \frac{1}{3} \dot{I}; \dot{I}_b = \frac{1}{2} \dot{I}_a = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3} \cdot \dot{I} = \frac{1}{6} \dot{I}; \\ \dot{I}_c &= \dot{I}_a - \dot{I}_b = \frac{1}{3} \dot{I} - \frac{1}{6} \dot{I} = \frac{1}{6} \dot{I}. \end{aligned}$$

Из последних двух выражений следует равенство \dot{I}_b и \dot{I}_c , что свидетельствует о фактическом наличии только двух эквивалентных участков цепи. В нашем случае одинаковыми являются величины протекающих по рёбрам токов, а их сопротивления являются искомыми величинами, по которым должны подбираться сечения или длины образующих их электропроводящих биологических сред. Поэтому такой методический подход обеспечивает определение параметров локальной области РО в виде объёмной кубической решётки с токопроводящими рёбрами при равенстве выделяемой активной P мощности в каждом ребре. Для равенства активной (тепловой) мощности, выделяемой каждым ребром куба, необходимо выполнение условия $P_a = P_b = P_c$. Принимая во внимание равенство активных мощностей произведению соответствующих активных сопротивлений и квадрата токов, запишем:

$$P_a = I_a^2 R_a = \left(\frac{1}{3}\right)^2 I^2 R_a = \frac{1}{9} I^2 R_a; \quad (4)$$

$$P_b = I_b^2 R_b = \left(\frac{1}{6}\right)^2 I^2 R_b = \frac{1}{36} I^2 R_b; \quad (5)$$

$$P_c = I_c^2 R_c = \left(\frac{1}{6}\right)^2 I^2 R_c = \frac{1}{36} I^2 R_c. \quad (6)$$

Отсюда $R_b = R_c = 4R_a$. Из выражений (4–6) несложно найти активные сопротивления рёбер куба, при которых равенство активных мощностей окажется достигнутым: $R_a = \frac{9P_a}{I^2}$, $R_b = \frac{9P_b}{I^2}$, $R_c = \frac{9P_c}{I^2}$. В знаменателях последних выражений присутствует ток I для ЭПРО. Для определения этого тока, протекающего по комплексному сопротивлению МЭП ($Z_{\text{МЭП}} = R_{\text{МЭП}} + jX_{\text{МЭП}}$), т.е. через $Z_1 \dots Z_{12}$,

воспользуемся соотношением $I = \frac{P}{U \cos \varphi}$. Таким образом:

$$\begin{aligned} R_a &= \frac{9P_a}{\left(\frac{P}{U \cos \varphi}\right)^2} = \frac{9 \cdot \frac{P}{12}}{\frac{P^2}{(U \cos \varphi)^2}} = \\ &= \frac{9P(U \cos \varphi)^2}{12P^2} = \frac{9(U \cos \varphi)^2}{12P} = \frac{3(U \cos \varphi)^2}{4P}; \end{aligned} \quad (7)$$

$$R_b = \frac{36P_b}{\left(\frac{P}{U \cos \varphi}\right)^2} = \frac{36 \cdot \frac{P}{12}}{\frac{P^2}{(U \cos \varphi)^2}} = \frac{36P(U \cos \varphi)^2}{12P^2} = \frac{3(U \cos \varphi)^2}{P}; \quad (8)$$

$$R_c = \frac{36P_c}{\left(\frac{P}{U \cos \varphi}\right)^2} = \frac{36 \cdot \frac{P}{12}}{\frac{P^2}{(U \cos \varphi)^2}} = \frac{36P(U \cos \varphi)^2}{12P^2} = \frac{3(U \cos \varphi)^2}{P}. \quad (9)$$

Например, при необходимости создания условий для выделения активной (тепловой) мощности в РТ при ЭПРО в форме объёмного решётчатого куба на уровне $P = 600$ Вт, это значение необходимо разделить на количество рёбер куба, т.е. на 12. В каждом ребре куба будет выделяться мощность $P_a = P_b = P_c = 50$ Вт. Для РО, как нагрузки ЭП (вторичного источника электропитания) с выходным напряжением $U_r = 5$ кВ, величина потребляемого тока при $\cos \varphi = 0,8$ [2] составит $I = \frac{P}{U \cos \varphi} = 0,15$ А. Из выражения (4) найдём величину R_a :

$$R_a = 9 \frac{P_a}{I^2} = \frac{9 \cdot 50}{0,15^2} = 20 \text{ кОм.}$$

Аналогично:

$$R_b = 36 \frac{P_b}{I^2} = \frac{36 \cdot 50}{0,15^2} = 80 \text{ кОм; } R_c = 36 \frac{P_c}{I^2} = \frac{36 \cdot 50}{0,15^2} = 80 \text{ кОм.}$$

В практических расчётах величина напряжения первичного ИЭЭ мобильной ЭТУ с аккумуляторными батареями (АКБ) регламентирована параметрами промышленных аккумуляторов. Следует отметить, что при выборе аккумуляторов для ЭТУ ЭПРО особое внимание уделяется учёту их масс. На сегодняшний день наилучшими эксплуатационными показателями обладают аккумуляторы литий-полимерной или литий-железотитанатной групп [12]. Как правило, шкала номинальных напряжений этих аккумуляторов составляет ряд, кратный напряжению одного элемента от 3,8 до 4,2 В. Принимая во внимание технико-экономические характеристики современных аккумуляторов, для электропитания нагрузки ЭТУ ЭПРО с АКБ и шириной захвата ЭС 2 м необходима модель первичного ИЭЭ с номинальным напряжением 48 В и ёмкостью 18 А·ч.

В экспериментальном исследовании физическая модельная решётка выполняется из проволоки с большим удельным сопротивлением, а внешнее электрическое напряжение подаётся к её двум точкам. Модельное локальное пространство РТ в эксперименте заполняется жидкой средой с ещё большим удельным сопротивлением, чем материал решётки. В качестве основных требований к токопроводящим элементам модельной объёмной решётки при использовании её в эксперименте выступают минимальная масса при максимальном удельном сопротивлении и способности выдерживать относительно большие токи. Для нагрева модельного локального пространства РТ в эксперименте, заполненного жидкой средой, целесообразно использовать токопроводящие элементы из молибдена, константана и нихрома. Выбор токопроводящих элементов удобно производить по величине их удельного линейного сопротивления $\underline{z}_l = r_l$, задаваясь активной мощностью в РО, напряжением электропитания и размерами локального объёма РТ при ЭПРО. При этом целесообразно использовать зависимости (7–9), полученные в результате деления правых частей выражений (4–6) на длину рёбер куба l :

$$r_{la} = \frac{3(U \cos \varphi)^2}{4Pl}; r_{lb} = \frac{3(U \cos \varphi)^2}{Pl}; r_{lc} = \frac{3(U \cos \varphi)^2}{Pl}. \quad (10)$$

Решая обратную задачу, этот цепно-полевой подход обеспечивает определение параметров напряжения (переменного $u_n(t) = \sqrt{2}U_n \sin 2\pi f_c t$ или постоянного тока $u_n(t) = U_n = U_{нсп} U_n$, f , t ЭП ЭТУ, необходимого для эффективного ЭПРО. Сравнивая величины протекающих по рёбрам токов с критическим для повреждения РО в электронной диагностике при ЭПРО во вторичной цепи схемотехнической системы ЭП, можно установить повреждённый элемент РО как мишени ЭПРО (целостный организм, система органов, отдельный орган, ткань, биопроба, клеточная система, отдельная клетка) и, соответственно, степень ЭПРО. Таким подходом обеспечивается оптимальный ввод электрической энергии для быстроедействия по времени и равномерности в пространстве ЭПРО (локальной области РО). Применение цепно-полевого подхода к электро- и биофизическому моделированию ЭТО и ЭТУ ЭПРО позволяет: 1) моделировать сложные особенности биологических и конструктивных сред исследуемого МЭП с учётом различных типов свойств материалов, что даёт возможность определить, как различные факторы могут повлиять на их структурно-функциональное состояние и ЭПРО; 2) создавать детальную визуализацию электрофизических свойств биосреды и ЭТП, что позволяет повысить достоверность оценки состояния МЭП с РО; 3) проводить моделирование во времени и оценить влияние ЭМП на состояние РО с течением времени.

В качестве источников получения информации в электрических цепях с РО, ЭС и ЭП выбрано численное (в программном пакете EWB) моделирование с применением более точных, соответственно, более сложных моделей цепи и её элементов, а также использование в эксперименте цифровых запоминающих осциллографов DS203 и DSO1052B (рис. 6). В качестве основного объекта исследований выбраны высоковольтные цепи ЭП с $U_{\theta}, u_{(1)}-u_{(n)}$ и ЭС с нагрузкой RLC ЭТУ, имеющие более сложную конфигурацию, чем цепи первичного ИЭЭ. Подобные ЭС с RLC элементами, как специфический тип нагрузки, определяют существенные особенности построения и работы ИЭЭ и ЭП ЭТУ ЭПРО. В эксперименте источник питания с напряжением $U_{\theta}, u_{(1)}-u_{(n)}$ формируется генераторами сигналов специальной формы АКИП 3407.

Методический подход с использованием аналитических и численных методов исследования обеспечивает определение параметров локальной области РО при равенстве выделяемой активной мощности P в каждом

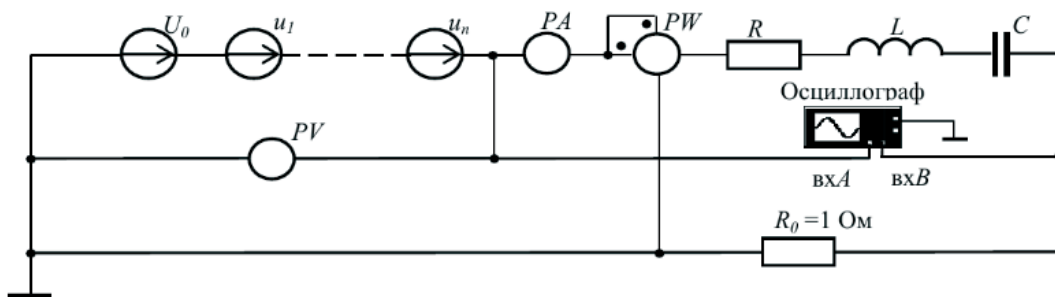


Рисунок 6 – Однофазная схема с RLC элементами для исследования электрофизических процессов в РО и ЭС в пакете EWB и с использованием осциллографа в эксперименте

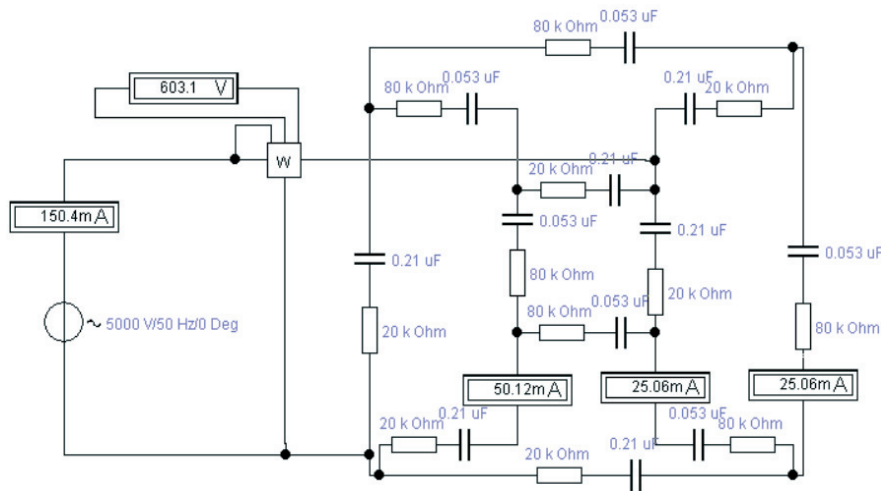


Рисунок 7 – Расчётная схема замещения нагрузки ЭП в виде локальной объёмной схемы замещения стебля РО как пассивного двухполюсника в пакете EWB при численном моделировании

ребре и, соответственно, схмотехническим решением, обеспечивающим равномерность ЭПРО. В рассматриваемом примере решения задачи РТ стебля в виде объёмной кубической решётки численным методом (рис. 7) внешнее синусоидальное напряжение $\dot{U} = u_n(t) = U_m \cdot \sin 2\pi \cdot f \cdot t$ приложено к наиболее удалённым друг от друга узлам 1 и 6 (рис. 46).

Сравнение результатов аналитических и численных исследований показывает почти идентичность выделения активной мощности в локальной области стебля РО при ЭПРО в форме объёмного решётчатого куба на уровне $P = 600$ Вт и $P = 603,1$ Вт по показанию ваттметра, а также значений общего тока в РТ $I = 0,15$ А и $I = 150,5$ мА, в рёбрах или токопроводящих элементах $I_b = I_c = 25,06$ мА и $I_a = 50,12$ мА по показаниям амперметров.

В практике проектирования выбор токопроводящих элементов физической модельной решётки РТ удобно производить по величине их удельного линейного сопротивления $z_l = r_l$, задаваясь активной мощностью в РО, напряжением ЭП и размерами локального объёма РО при ЭПРО. При этом целесообразно использовать зависимости, полученные выше в результате аналитиче-

ского исследования. В данном подходе сопротивления рёбер являются известными величинами, по которым на следующем этапе решения должны подбираться сечения или длины образующих их проводящих растительных сред. Полученные схмотехнические (рис. 2, 3) и математические (1–10) модели электрофизических свойств биосреды и распределения токов в ЭП, МЭП ЭТУ позволяют обосновать новые энергоэффективные способы и устройства (частные схмотехнические примеры их осуществления) ЭПРО, а также режимы их ЭТО.

Значительного повышения эффективности ЭТУ ЭПРО можно достичь за счёт разработки и внедрения новых функциональных подсистем, предназначенных для оперативного мониторинга электрического состояния МЭП и РО, а также управления режимами работы ЭС в условиях ЭТП ЭПРО. Следует отметить, что существующие методы и технологии не позволяют в достаточной степени решать эти задачи, т.к. в настоящее время практически отсутствуют соответствующие модели и методы их решения в режиме реального времени. Поэтому, в соответствии с теорией оперативного мониторинга электрического состояния биосред, следует предложить

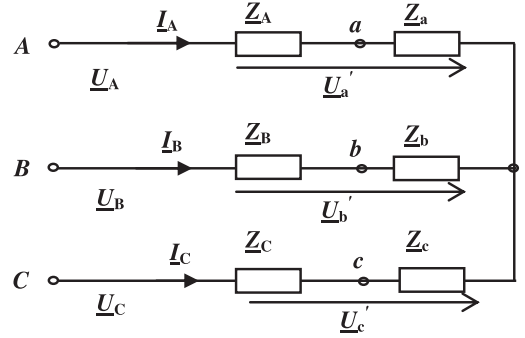
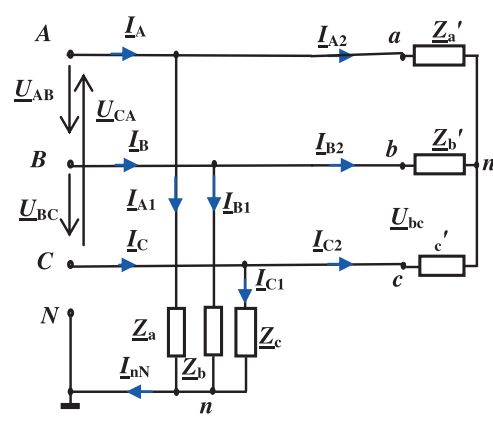
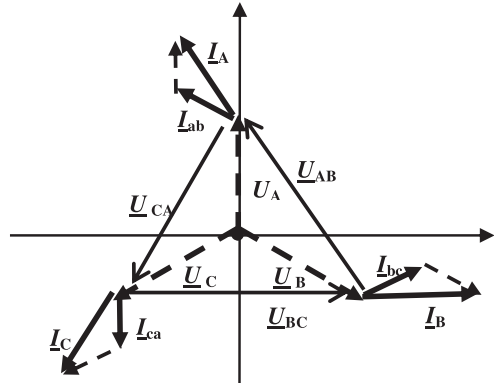
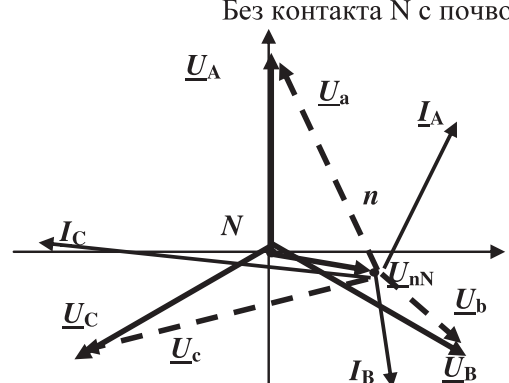
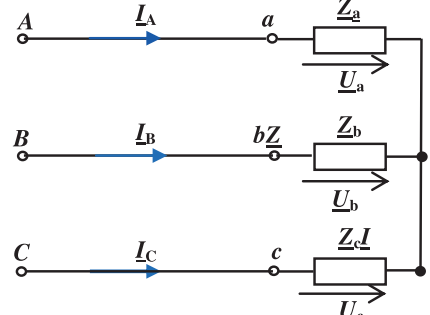
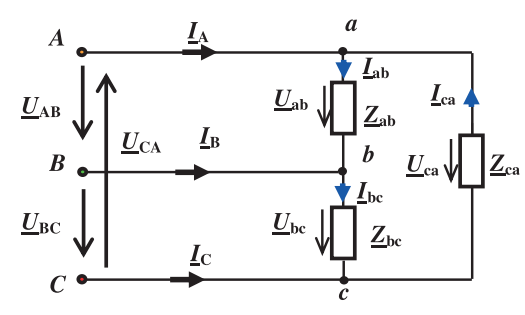
Таблица 4 – Типичные схмотехнические и аналитические модели ЭС трёхфазных ЭТУ ЭПРО¹

Вид модели	Топология (расположение) ЭС	
	над поверхностью почвы	в верхнем слое почвы и на её поверхности
Физическая		

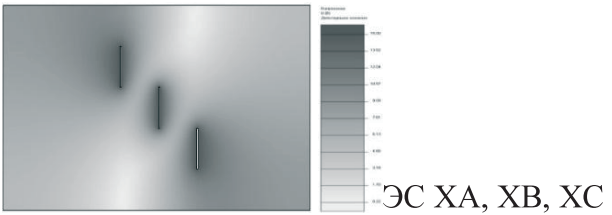
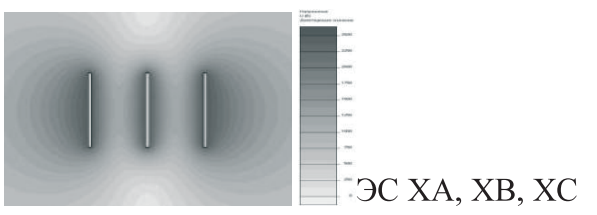
Продолжение таблицы 4

Вид модели	Топология (расположение) ЭС	
	над поверхностью почвы	в верхнем слое почвы и на её поверхности
Схема замещения		
Расчётная схема		
Аналитическая	$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}; \underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}; \underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}$	$\underline{I}_{A1} = \frac{\underline{U}_A}{Z_a}; \underline{I}_{B1} = \frac{\underline{U}_B}{Z_b}; \underline{I}_{C1} = \frac{\underline{U}_C}{Z_c};$ $\underline{I}_{nN} = \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{B1} + \underline{I}_{C1}$
Векторная диаграмма	<p>При симметричной нагрузке</p>	<p>При несимметричной нагрузке и контакте N ЭП и ЭС с почвой</p>

Продолжение таблицы 4

Вид модели	Топология (расположение) ЭС	
	над поверхностью почвы	в верхнем слое почвы и на её поверхности
Преобразование схемы	$\underline{Z}_a = \frac{\underline{Z}_{ab}\underline{Z}_{ca}}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca}}, \underline{Z}_b = \frac{\underline{Z}_{bc}\underline{Z}_{ab}}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca}}, \underline{Z}_c = \frac{\underline{Z}_{ca}\underline{Z}_{bc}}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca}}$ 	
Аналитическая	$i_a + i_b + i_c = 0;$ $\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0;$ $\underline{U}_{AB} = \underline{I}_A(\underline{Z}_A + \underline{Z}_a) - \underline{I}_B(\underline{Z}_B + \underline{Z}_b);$ $\underline{U}_{BC} = \underline{I}_B(\underline{Z}_B + \underline{Z}_b) - \underline{I}_C(\underline{Z}_C + \underline{Z}_c)$	$\underline{I}_{A1} = \frac{\underline{U}_A}{\underline{Z}_a}; \underline{I}_{B1} = \frac{\underline{U}_B}{\underline{Z}_b}; \underline{I}_{C1} = \frac{\underline{U}_C}{\underline{Z}_c};$ $\underline{I}_{nN} = \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{B1} + \underline{I}_{C1}.$ $\underline{I}_{A2} = \underline{U}_A / \underline{Z}'_a; \underline{I}_{B2} = \underline{U}_B / \underline{Z}'_b; \underline{I}_{C2} = \underline{U}_C / \underline{Z}'_c;$ $\underline{I}_A = \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2}; \underline{I}_B = \underline{I}_{B1} + \underline{I}_{B2}; \underline{I}_C = \underline{I}_{C1} + \underline{I}_{C2}$
Векторная диаграмма		<p>Без контакта N с почвой</p> 
Упрощённая схема		
Аналитическая	$\underline{U}_a = \underline{I}_A \cdot \underline{Z}_a; \underline{U}_b = \underline{I}_B \cdot \underline{Z}_b; \underline{U}_c = \underline{I}_C \cdot \underline{Z}_c$	$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{ab}}; \underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_{bc}}; \underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{Z}_{ca}}.$ $\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}; \underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}; \underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}$

Продолжение таблицы 4

Вид модели	Топология (расположение) ЭС	
	над поверхностью почвы	в верхнем слое почвы и на её поверхности
Численная		
Аналитическая ²	<p>I_3 зависит от U_r и степени проявления импеданса в поверхностях сложной формы (электродов, наружных тканей и клеточных мембран РО). Подход к электронной диагностике РО, ЭТП и ЭС предполагает измерение $i_{A'}, i_{B'}, i_{C'}, I_{A'}, I_{B'}, I_{C'}$. Для диагностики износа или повреждений ЭС в одном из состояний, например, режима короткого замыкания, при низком U_r фиксируется вектор \dot{I}_3. В этом случае импеданс $\bar{Z} = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_3}$ и подход к диагностике предполагает измерение вектора тока $\dot{i}_3 = \frac{\dot{U}_m}{\bar{Z}}$ и сравнение его с некоторым эталонным вектором \dot{I}_E. Ненулевая разность $\dot{i}_3 - \frac{\dot{U}_m}{\bar{Z}}$ свидетельствует о наличии отклонений ЭС от эталонного образца. При этом будет установлен факт износа или повреждений, но не место. Если в $\bar{Z} = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_3}$ измерить элементы матрицы $\frac{1}{\bar{Z}}$ и сравнить их с соответствующими элементами эталонной матрицы $\frac{1}{\bar{Z}_E}$, то можно установить повреждённый элемент ЭС. Так как к основному компоненту ЭТП ЭПРО относится включение к ЭП РО в электрическую цепь через систему электродов, то в зависимости от контекста РО как мишени ЭПРО (целостный организм, система органов, отдельный орган, ткань, биопроба, клеточная система, отдельная клетка) можно установить повреждённый элемент РО и, соответственно, степень ЭПРО</p>	

Примечания:

¹ А, В, С – индексы номеров фаз А, В, С; i_{ab}, u_{ab}, Z_{ab} – синусоидальные мгновенные ток, напряжение и сопротивление нагрузки между соответствующими фазами ab ЭС с РО и почвой; $i_{A'}, Z_{A'}$ – мгновенный ток и комплексное сопротивление фазы А; u_A – напряжение, соответственно, на участке фазы А; $I_{A'}, U_A$ – комплексный ток и комплексное напряжение на входе соответствующей фазы А; N, n – нейтральные точки ЭП и ЭС, почвы.

² Модельные результаты дают возможность идентифицировать электрическое состояние электротехнологической цепи в условиях ЭТП ЭПРО, соответственно, ЭС и РО. Эти положения позволяют развить ЭТУ и ЭТП ЭПРО при оперативной (электронной) диагностике ЭТП, разработке электродов и ЭС с ЭП (управляемые, автоматизированные ЭС; электронные системы распознавания, так называемое «электронное зрение»; технические и технологические решения ЭПРО для эффективного управления ЭМП в объёмах с координатными границами – полосе захвата ЭС ЭТУ).

возможные методы идентификации математической модели трёхфазной ЭС ЭТУ в условиях ЭТП ЭПРО.

Применение показателей пассивных электрических свойств РО (импеданса \underline{Z} или иммитанса \underline{Y}) разрабатывается в качестве диагностического метода ЭПРО во многих приложениях. При этом каждый элементарный участок РТ характеризуется величиной \underline{Z} , полученной исходя из формы, линейных размеров и относительного положения в совокупности других проводников. Расчёт \underline{Z} производится с учётом глубины проникновения тока в каждый элементарный проводник РО и их формы. С ростом частоты импеданс РО снижается, благодаря ёмкостной составляющей клеточных мембран, наружных оболочек органов растений, РТ. Изменение \underline{Z} как показателя ЭПРО (клеток и тканей и органов растений) выражает изменение ёмкостных свойств не только поверхностных цитоплазматических, но и внутренних мембран эндоплазматической сети и клеточных органоидов.

Модель (рис. 5) представляет собой принципиальную электрическую схему каскадной линии, включающую в себя каскады в виде четырёхэлементной схемы R_2, R_1, R_3, C_m (рис. 1Б). При таком подходе проблематично получить одно решение, которое соответствовало бы физической сути протекающих в РО ЭТП ЭПРО и не

выходило за количественные рамки, установленные экспериментально. Достоверным способом определения параметров элементов схемы замещения является метод анализа переходного процесса, протекающего в схеме замещения РО при подаче сигнала низкого напряжения прямоугольной формы. В качестве объектов исследования рассматриваются ЭС трёхфазных ЭТУ, эквивалентные (расчётные) схемы, аналитические модели и векторные диаграммы которых приведены в [2] и таблице 4.

Следует выделить, что аналитические, численные и экспериментальные исследования, а также математическое моделирование электрических цепей и ЭМП для решения задачи повреждения нежелательного РО основываются на решении, в той или иной форме, задачи возбуждения ЭМП в объёме этого РО, а объектом обработки являются сложные по своим физико-химическим свойствам биологические материалы. Так как при такой технологии основным воздействующим фактором является ЭМП, то, естественно, для раскрытия механизма воздействия и оптимизации параметров обработки необходимо достоверно представлять картину электрического поля в объекте обработки. Топология электродов при ЭПРО влияет на создаваемую картину напряжён-

ности электрического поля ЭС, интенсивность поля, наведение в локальной зоне с РТ активной мощности и электротехнологический эффект. Подобное моделирование можно проводить и для почвенных макро- и микроорганизмов, людей и животных, оказавшихся вблизи электродов ЭТУ и попавших в ЭМП ЭС, которое будет распространяться в этих биосредах. Сравнение результатов теоретических, численных и экспериментальных исследований показало адекватность построенных в работе математических моделей и их пригодность при исследовании электрофизических и других процессов, протекающих при ЭПРО в ЭМП ЭТУ. Отклонение результатов теоретического, численного и экспериментального исследований составляет не более 15%, что является приемлемым при проведении научных исследований.

Выводы.

1. В соответствии с поставленной целью разработаны и представлены схематические, математические и численные модели растительных объектов, позволяющие изучать электрофизические свойства (импеданс и его составляющие) биологической среды, подвергающейся воздействию электрической энергии и параметров окружающей среды.

2. При проектировании и определении параметров ЭТО и оборудования ЭТУ ЭПРО необходимо руководствоваться зависимостями поглощаемой энергии в РТ и её комплексного сопротивления, представленными функциональной зависимостью по факторам электромагнитного воздействия, размерам и электрофизическим свойствам РО в условиях структурной неоднородности РТ, изменяющихся в процессе электрического повреждения. Мощность, требуемая для ЭПРО, зависит от рабочего напряжения, производительности установки и топологии ЭС. Основными преимуществами электротехнологического способа уничтожения нежелательной растительности является его безынерционность, высокий КПД и избирательность воздействия по отношению к различным растительным объектам.

3. Анализ системы 12 линейных алгебраических уравнений, описывающих взаимосвязь электрофизических параметров локальной области биосреды, выполненной в виде объёмной кубической решётки, показал, что для обеспечения одинакового выделения активной (тепловой) энергии на всех участках цепи разность токов будет наблюдаться только в двух группах электропроводящих рёбер куба. Сопротивления рёбер куба, не соединяющихся с узлами подведения технологическо-

го напряжения, равно частному от деления утроенного квадрата технологического напряжения на полную выделяемую активную (тепловую) мощность электропроводящей биосредой РО. Сопротивления рёбер куба, соединяющихся с узлами подведения электропитания, превышает сопротивления остальных рёбер в четыре раза.

4. Энергетическая концепция, обеспечивающая выделение в локальной области биосреды заданной активной (тепловой) мощности при ЭТО РО, практически осуществима путём выделения отдельных элементарных объёмов РТ, множество которых анализирует исследуемую ЭС с РО. По расчётным электрофизическим свойствам РТ определяются плотности тока проводимости, ток электрода, которые обеспечивают определение параметров локальной области РО, электродов и ЭС. Оптимизация ЭТП ЭПРО достигается варьированием дозы вводимой энергии, интенсивности и частоты ЭМП вне и внутри РО, а также модификацией их окружения (температуры, влажности, величины рН, ионной силы). Указанные факторы оказывают значительное влияние на конформационное состояние различных систем РО, их устойчивость и энергозатраты при ЭПРО.

5. Применение цепно-полевого подхода к электро- и биофизическому моделированию оборудования ЭТУ и ЭТП ЭПРО позволяет:

- моделировать сложные особенности биологических и конструкционных сред исследуемого МЭП с учётом теории электрических цепей и электромагнитного поля, различных свойств материалов, что даёт возможность определить, как различные факторы могут повлиять на их структурно-функциональное состояние и ЭПРО;

- создавать детальную визуализацию электрофизических свойств РО и ЭТП, что позволяет повысить достоверность оценки состояния МЭП с РО;

- проводить моделирование во времени и оценить влияние воздействия ЭМП на состояние РО с течением времени.

6. Дальнейшие исследования должны быть направлены на уточнение параметров моделей для других видов локальной области РО, а также на изучение комбинированного воздействия ЭМИ с другими физическими и химическими агентами. Разработанный цепно-полевой подход может стать эффективным инструментом как для научных исследований, так и для оптимизации практических процессов ЭПРО.

Список источников

1. Куликова Л. В., Григорьев А. В. Математическое моделирование электрофизических свойств растительных материалов с учетом их поляризации // Ползуновский вестник. 2012. № 4. С. 121–126. EDN PYQBFN.
2. Ляпин В. Г. Оборудование и энергосберегающая электротехнология борьбы с нежелательной растительностью / Новосибир. гос. аграр. ун-т. 2-е изд. перераб. и доп. Новосибирск, 2012. 366 с.
3. Загинайлов В. И. Электрофизические методы и средства контроля и управления сельскохозяйственными технологиями : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.02. М., 2007. 35 с.
4. 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.
5. Тригорлый С. В., Джема Д. В., Лаврентьев В. А., Ермолаева В. В. Математические модели управления рабочими режимами электротехнологических процессов и установок // Молодой ученый. 2017. № 35 (169). С. 10–15. EDN ZFCEDZ.
6. Загинайлов В. И. Электростимуляция и электропробой тканей биологических объектов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2006. № 1. С. 25–27. EDN НТВТJJ.

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. Kim R. P., Korchagin S. A. Mathematical and computer simulation of the electrophysical properties of a multicellular structure exposed to nanosecond electrical pulses // *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*. 2021. Vol. 21, No. 2. P. 259–266. DOI 10.18500/1816-9791-2021-21-2-259-266. EDN QEZEHV.
9. Лавров И. В. Методы вычисления эффективных электрофизических свойств неоднородных сред с учетом многообразных структурных особенностей. Обзор // *Известия высших учебных заведений. Электроника*. 2023. Т. 28, № 4. С. 403–430. DOI 10.24151/1561-5405-2023-28-4-403-430. EDN TYTHFH.
10. Ляпин В. Г., Инкин А. И. Поглощение электромагнитной энергии в растительной ткани // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2002. № 11. С. 6–8. ISSN 0206-572X.
11. Белов Д. В., Ляпин В. Г., Андреев С. А. Электронагрев гелия в рабочей камере беспилотного микродирижабля // *Международный технический журнал*. 2024. № 4 (91). С. 72–80. DOI 10.34286/2949-4176-2024-91-4-72-80. EDN CVCIZU.
12. Фатыхов Р. Р., Хантимеров С. М., Сулейманов Н. М. Перспективы применения литий-ионных аккумуляторов в качестве резервных источников питания на электрических станциях // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2017. № 4 (36). С. 45–53. EDN XPHWEH.

References

1. Kulikova L. V., Grigor'ev A. V. Matematicheskoe modelirovanie elektrofizicheskikh svoystv rastitel'nykh materialov s uchetom ih polarizatsii // *Polzunovskij vestnik*. 2012. № 4. S. 121–126. EDN PYQBFN.
2. Lyapin V. G. Oborudovanie i energosberegayushchaya elektrotekhnologiya bor'by s nezhelatel'noj rastitel'nost'yu / *Novosib. gos. agrar. un-t. 2-e izd. pererab. i dop. Novosibirsk*, 2012. 366 s.
3. Zaginajlov V. I. Elektrofizicheskie metody i sredstva kontrolya i upravleniya sel'skohozyajstvennymi tekhnologiyami : avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk : 05.20.02. M., 2007. 35 s.
4. Uglovskij A. S., Semerenko N. Yu. Optimizatsiya processa udaleniya sornykh 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 NWWFJU.
5. Trigorlyj S. V., Dzhema D. V., Lavrent'ev V. A., Ermolaeva V. V. Matematicheskie modeli upravleniya rabochimi rezhimami elektrotekhnologicheskikh processov i ustanovok // *Molodoj uchenyj*. 2017. № 35 (169). S. 10–15. EDN ZFCEDZ.
6. Zaginajlov V. I. Elektrostimulyatsiya i elektroproboj tkanej biologicheskikh ob'ektov // *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo hozyajstva*. 2006. № 1. S. 25–27. EDN HTBTJJ.
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. Kim R. P., Korchagin S. A. Mathematical and computer simulation of the electrophysical properties of a multicellular structure exposed to nanosecond electrical pulses // *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*. 2021. Vol. 21, No. 2. P. 259–266. DOI 10.18500/1816-9791-2021-21-2-259-266. EDN QEZEHV.
9. Lavrov I. V. Metody vychisleniya effektivnykh elektrofizicheskikh svoystv neodnorodnykh sred s uchetom mnogoobraznykh strukturnykh osobennostej. Obzor // *Izvestiya vysshix uchebnykh zavedenij. Elektronika*. 2023. Т. 28, № 4. С. 403–430. DOI 10.24151/1561-5405-2023-28-4-403-430. EDN TYTHFH.
10. Lyapin V. G., Inkin A. I. Pogloshchenie elektromagnitnoj energii v rastitel'noj tkani // *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo hozyajstva*. 2002. № 11. С. 6–8. ISSN 0206-572X.
11. Belov D. V., Lyapin V. G., Andreev S. A. Elektronagrev geliya v rabochej kamere bespilotnogo mikrodirizhablya // *Mezhdunarodnyj tekhnicheskij zhurnal*. 2024. № 4 (91). С. 72–80. DOI 10.34286/2949-4176-2024-91-4-72-80. EDN CVCIZU.
12. Fatykhov R. R., Khantimerov S. M., Sulejmanov N. M. Perspektivy primeneniya litij-ionnykh akkumulyatorov v kachestve rezervnykh istochnikov pitaniya na elektricheskikh stanciyah // *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2017. № 4 (36). С. 45–53. EDN XPHWEH.

Сведения об авторах

Виктор Григорьевич Ляпин – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроснабжения и теплоэнергетики имени академика И. А. Будзко, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», spin-код: 2335-4214.

Владимир Ильич Загинайлов – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроснабжения и теплоэнергетики имени академика И. А. Будзко, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», spin-код: 5230-0756.

Сергей Андреевич Андреев – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И. Ф. Бородин, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», spin-код: 8453-6024.

Information about the authors

Viktor G. Lyapin – Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Power Supply and Thermal Power Engineering named after Academician I. A. Budzko, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian Timiryazev State Agrarian University", spin-code: 2335-4214.

Vladimir I. Zaginaylov – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor of the Department of Power Supply and Thermal Power Engineering named after Academician I. A. Budzko, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian Timiryazev State Agrarian University", spin-code: 5230-0756.

Sergey A. Andreev – Doctor of Technical Sciences, Docent, Professor of the Department of Automation and Robotization of Technological Processes named after Academician I. F. Borodin, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian Timiryazev State Agrarian University", spin-code: 8453-6024.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.