

# К ПАРАМЕТРАМ И ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЭЛЕКТРОДНОЙ ТЕХНИКИ

В.Г.Ляпин

*В обзоре обсуждаются вопросы электродных систем электротехнологических культиваторов и ряд аспектов, связанных со съемом электрофизической информации растительных тканей и почвы. Статья посвящена исследованию электромагнитных полей протяженного электрода в неограниченной слабопроводящей или диэлектрической среде при учете влияния границы раздела сред с различными физическими свойствами. Наряду с определением электродов в электротехнологиях, электрофизиологии и биофизике, в статье изложена методика расчета напряжений прикосновения и шага электротехнологических культиваторов с электродами указанного типа при электрокультивации синусоидальным током.*

## Введение

В электротехнологиях, электрофизиологии и биофизике имеется общая методическая основа - включение объекта, в т.ч. и биологического (БО) в электрическую цепь через систему электродов (ЭС) [1-13]. В зависимости от контекста под БО понимается целостный организм, система органов, отдельный орган, ткань, биопроба, клеточная система, отдельная клетка. Вопросы проектирования блоков, осуществляющих взаимодействие электромагнитного поля (ЭМП) с БО, считаются самыми важными и необходимо обеспечить оптимальное сочленение элементов ЭС с биологическим организмом. Поэтому одно из главных направлений работ в области биофизики, электротехнологии и электрофизиологии - создание моделей среды распространения ЭМП между электродами, как базы для инженерных электромагнитных расчетов, разработки аппаратов, оборудования, электротехнологических установок и их эксплуатации. В связи с этим представляется целесообразным провести анализ электродов, содержащихся в электрической цепи электротехнологических, электрофизиологических и биофизических установок и исследовать возможность получения параметров и характеристик электродной техники на основе оптимального сочленения элементов ЭС с БО.

Параметры и характеристики электродов и ЭС сравнительно мало изучены, хотя они представляют большой интерес ввиду их широкого применения в качестве датчиков, систем сопряжения и "рабочих органов" в диагностике, экспериментальных исследованиях, электротехнологиях. Экспериментальное исследование электродов в многоэлектродных системах представляет определенную сложность, поскольку требует достоверную информацию о параметрах каждого электрода в

отдельности, чтобы характеризовать ЭС в целом. Следует отметить, что как по условиям эксперимента, так и по степени проработки вопроса данная работа существенно отличается от общеизвестных методов анализа ЭМП в электротехнологиях, электрофизиологии и биофизике.

Основные характеристики и параметры электродов и ЭС определяют их целевую применимость. Как видно из приведенных в [1-13] сведений, электроды и ЭС обладают довольно высокой реакционной способностью. Высокая склонность БО к комплексообразованию с ионами многих металлических электродов усложняет исследование системы "электрод-БО". В настоящем обзоре рассмотрены электроды и ЭС, применяемых в электротехнологиях, электрофизиологии и биофизике для проведения технологического процесса, диагностики, экспериментальных исследований. Структура обзора отражает вопросы ЭМП ЭС на примере электротехнологических культиваторов (ЭТК) и ряд аспектов, связанных со съемом электрофизической информации растительных тканей и почвы. Далее рассматриваются методы исследования ЭМП на примере протяженного электрода в неограниченной слабопроводящей или диэлектрической среде при учете влияния границы раздела сред с различными физическими свойствами. Наряду с определением электродов, в обзоре изложена методика расчета напряжений прикосновения и шага ЭТК с электродами указанного типа при электрокультивации синусоидальным током высокого напряжения. В заключительной части обзора приведены сведения о программных комплексах для решения конкретных задач расчета ЭС.

## Электрод, ЭС и их классификации

Известно [1-6, 9-13], что устройство сопряжения электротехнического средства с

БО, т.е. ЭС - это совокупность электродов, определенным образом связанных между собой и источником электрической энергии, предназначенных для подвода ЭМП к биологическим тканям. Параметрами ЭС являются: число фаз, форма, размеры, число и материал электродов, расположение (топология) электродов и расстояние между ними, электрическая схема соединения ("звезда", "треугольник", смешанное соединение и т.д.) и др. При расчете ЭС определяют их геометрические параметры, обеспечивающие выделение в биологической среде заданной мощности и исключающих возникновение ненормальных режимов.

К примеру, принцип работы ЭТК [2, 3] состоит в создании ЭМП в межэлектродном промежутке (МЭП) - воздушной среде, почве и БО. Целевой функцией ЭС ЭТК является осуществление электрического контакта с растительностью - подвод технологического напряжения. Поэтому к ЭС относятся все устройства и элементы, связанные с подводом электрической энергии к растениям, а потребителем является МЭП с растениями и окружающей их средой, преобразующие электроэнергию в другие виды энергии с целью электрического повреждения растений. В выполнении указанных функций определенную роль играют внутренние звенья ЭС (токоподводы, различного рода концентраторы ЭМП, металлические кольца, специальные экраны, замкнутые накоротко или на емкостный элемент катушки, и т.д.), на которых смонтированы электроды. Именно в МЭП преобразуется до 85% установленной мощности и здесь ресурс энергосбережения ЭТК.

Изучаемая связь между химическими и электрическими явлениями в МЭП еще не установлена, однако в простейшем понимании электрод - это проводник, предназначенный для введения в воздушную среду, почву и растительные ткани с целью пропускания через БО электрического тока. Подобный подход позволяет говорить о форме электрода, особенностях его конструкции, величине поверхности, что важно в исследованиях. По определению, электродом как элементом электрохимической цепи следует называть всю систему соединенных проводящих фаз, начинающихся металлом и заканчивающихся электролитом (в нашем случае почвой, БО). Тем самым учитываются оксидные или солевые слои на металле, возможная адсорбция газов, а также природа и состав БО.

Все электроды в электротехнологиях, электрофизиологии и биофизике разделяют

на две основные группы, связанные с наличием или отсутствием электродных реакций. Дальнейшая классификация проводится по природе веществ, участвующих в электродном процессе. Научный и практический интерес вызывают электродные системы без электрохимической реакции, в которых отсутствует переход электронов через границу раздела фаз, например, скользящие контакты силовых подвижных средств. С точки зрения тенденций развития электрокультивации и применимости технических решений в [2-4, 10, 11, 13] приведены достаточно разнообразные электроды и ЭС ЭТК (рис. 1), естественно не исчерпывающие всю их полноту.

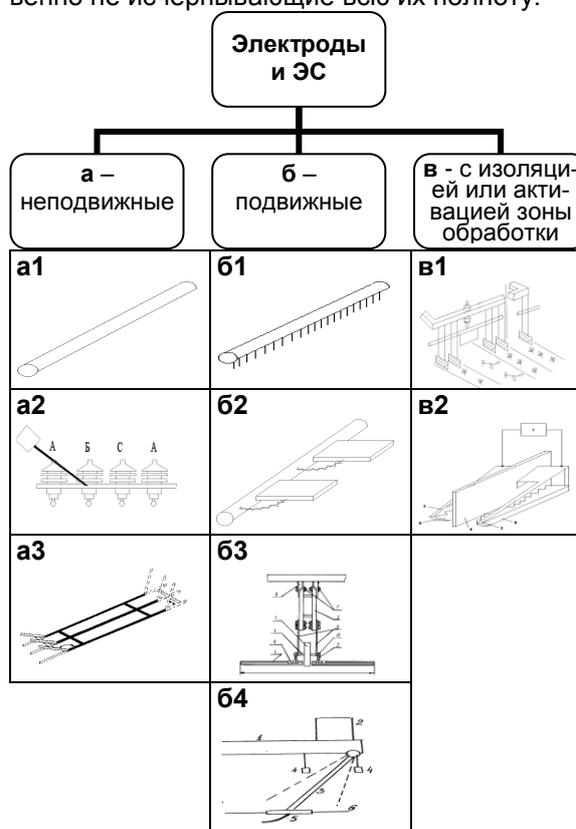


Рис. 1. Электроды и ЭС ЭТК:  
**а1** - штанга; **а2** - опытной установки НИИОХ НПО "Россия"; **а3** - LW (США); **б1** - с токопроводящими проволочками; **б2** - с пружинными лепестками (США); **б3** - копирующий микрорельеф поверхности почвы; **б4** - с датчиками регулирования положения рамы; **в1, в2** - с механическими делительными элементами (**в1** - LW-5, **в2** - для предуборочной обработки ботвы)

Материал электродов является источником создания электронов и ионов в МЭП. Определяющими для ЭС являются вольтамперные характеристики, улучшение которых обусловлено рациональным выбором соотношений геометрии ЭС, их массогабаритных пока-

## К ПАРАМЕТРАМ И ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЭЛЕКТРОДНОЙ ТЕХНИКИ

зателей. Наиболее распространен в электрофизиологии и электротехнологиях, в частности в ЭТК, протяженный электрод круглого или прямоугольного сечения.

### К аналитическому расчету токопровода

Задача расчета ЭМП круглого токопровода, расположенного в почве или воздухе параллельно границе раздела сред, в силу ее важности для исследования поля и параметров ЭТК, многократно решалась для заземлителей [14, 15] и линий электропередачи [16] при различных упрощающих допущениях относительно физических параметров грунта, частоты, распределения векторов поля и плотности тока в токопроводнике и грунте.

В [14] отмечено, что исследования электромагнитных процессов в системах протяженных неэквипотенциальных заземлителей выполняются, как правило, на основе теории цепей с распределенными параметрами, причем значения вводимых интегральных параметров определяются без использования полевых расчетов, вследствие чего модель становится неадекватной заземлителю. Поскольку ЭМП протяженных электродов ЭТК, заземлителей и линий электропередачи во многом аналогичны и при их исследовании определяются однотипные величины и характеристики: постоянная распространения, волновое и входное сопротивления, интегральные параметры и т.д., представляется целесообразным использовать при решении задач, связанных с электромагнитными процессами в протяженном электроде, методологическую и теоретическую базу решения полевых задач для линий электропередачи и протяженных заземлителей.

Целью дальнейшего исследования являются волновые параметры и практические характеристики взаимодействия электрода с почвой - входное и переходное сопротивление, напряжения прикосновения и шага. Методика базируется на интегральных представлениях векторов ЭМП и опирается на результаты, полученные для полей линий электропередачи и протяженных заземлителей [14-16]. Постановку задачи поясняют рис. 2-4 [17], на которых показаны прямые, длинные электроды круглого сечения, проложенные параллельно плоской границе раздела сред с удельными сопротивлениями  $\rho_2, \rho_3 \approx 10^2 \dots 10^6$  Ом\*м, при удельном сопротивлении электродов  $\rho_1 \approx 10^{-7}$  Ом\*м. Емкость единицы длины МЭП двух протяженных электродов (рис. 2) определяется соотношением

$$C_0 = C/L_z = q/L_z(\varphi_1 - \varphi_2) = \tau/(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (1)$$



Рис. 2. Геометрия протяженных электродов

Для того, чтобы определить емкость МЭП, достаточно задаться произвольным значением линейной плотности заряда  $\tau = -\tau$  на электродах, рассчитать электрическое поле в МЭП и определить потенциалы электродов, обусловленные этим полем. Если электроды находятся в различных диэлектрических средах, для расчета поля целесообразно воспользоваться методом зеркальных изображений, учитывающим неоднородность среды посредством двух расчетных моделей (рис. 3) с фиктивными зарядами

$$\tau_1 = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \tau, \quad \tau_2 = \frac{2\varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \tau, \quad (2)$$

$$\tau_1^* = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \tau^*, \quad \tau_2^* = \frac{2\varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \tau^*,$$

расположенными в однородных средах симметрично относительно границы их раздела.

Если считать, что поперечные размеры электродов малы по сравнению с межэлектродным расстоянием, для расчета электрического поля и определения потенциалов электродов можно воспользоваться методом наложения, рассматривая их как заряженные оси. При этом потенциал каждого из электродов будет определяться совокупностью трех потенциалов (рис. 3), обусловленных исходными зарядами электродов и их зеркальными изображениями.

Электрическая напряженность в произвольной точке, удаленной на расстоянии  $r$  от заряженной оси (рис. 4), может быть определена по теореме Гаусса

$$\oint_S \vec{E} d\vec{s} = \frac{Q_{св}}{\varepsilon},$$

рассмотренной в применении к замкнутой цилиндрической поверхности  $S$ , коаксиальной с заряженной осью и проходящей через исследуемую точку.

Учитывая, что на боковой поверхности этого цилиндра  $\vec{E} \uparrow \uparrow d\vec{s}$  и  $E = \text{const}$ , а на торцовых поверхностях цилиндра  $\vec{E} \perp d\vec{s}$ ,

$$\iint_S \vec{E} d\vec{s} = \int_{S_{бок}} E ds \cos 0^\circ + 2 \int_{S_{гор}} E ds \cos \frac{\pi}{2} = E \int ds = E \cdot 2\pi r \cdot l_z = \frac{\tau \cdot l_z}{\epsilon} \quad (3)$$

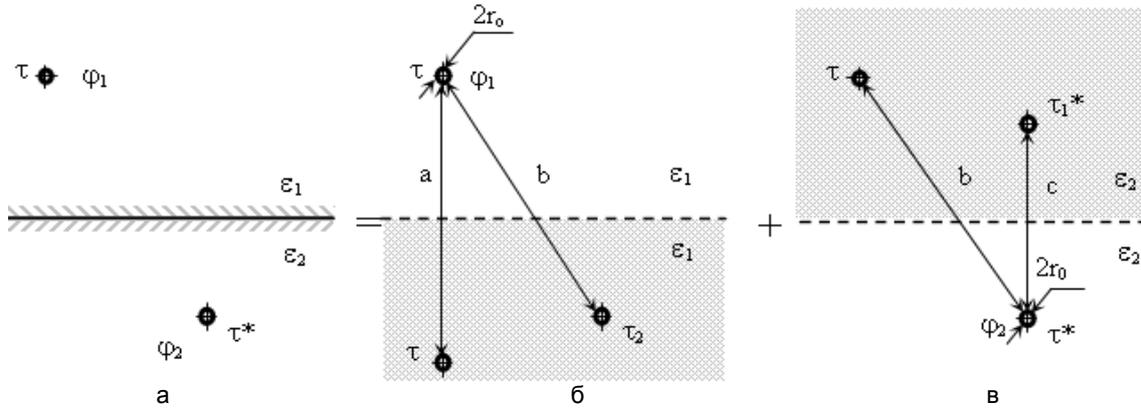


Рис. 3. Геометрия электродов, обусловленных исходными зарядами и их зеркальными изображениями

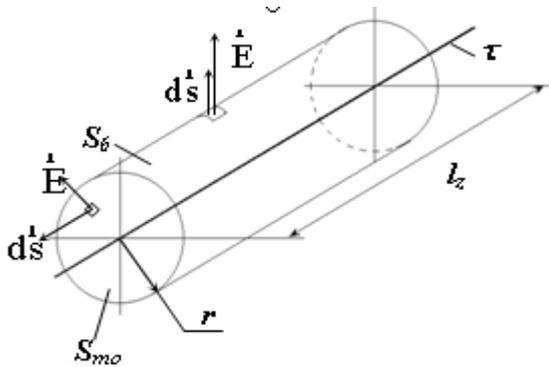


Рис. 4. Электрическая напряженность от заряженной оси, рассмотренной в применении к замкнутой цилиндрической поверхности  $S$

В итоге, в любой точке, отстоящей на расстоянии  $r$  от заряженной оси,

$$\vec{E} = \frac{\tau}{2\pi r \epsilon} \vec{e}_r \quad (4)$$

Потенциал электрического поля, порождаемого зарядом на оси, связан с электрической напряженностью известным соотношением

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi = -\frac{d\varphi}{dr} \vec{e}_r \quad (5)$$

из которого следует,

$$\varphi = -\int E dr = -\int \frac{\tau}{2\pi r \epsilon} dr = -\frac{\tau}{2\pi \epsilon} \ln(r) + c \quad (6)$$

где  $c$  - постоянная интегрирования.

Это соотношение может быть распространено на расчетные модели, представленные на рис. 3. В соответствии с принципом наложения потенциал  $\varphi_1$  электрода, находящегося в среде с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_1$  будет определяться совокуп-

ностью потенциалов, обусловленных осевыми зарядами  $\tau, \tau_1, \tau_2^*$

$$\varphi_1 = \varphi_\tau + \varphi_{\tau_1} + \varphi_{\tau_2^*} = -\left[ \frac{\tau}{2\pi \epsilon_1} \ln(r_0) + \frac{\tau_1}{2\pi \epsilon_1} \ln(a) + \frac{\tau_2^*}{2\pi \epsilon_1} \ln(b) \right] + c_1 \quad (7)$$

где  $c_1$  - результирующая для среды с  $\epsilon_1$  постоянная интегрирования.

Аналогично вышеизложенному, потенциал  $\varphi_2$  электрода, находящегося в среде с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_2$  (рис. 3в) будет определяться совокупностью потенциалов, обусловленных осевыми зарядами  $\tau^*, \tau_1^*, \tau_2$

$$\varphi_2 = \varphi_{\tau^*} + \varphi_{\tau_1^*} + \varphi_{\tau_2} = -\left[ \frac{\tau^*}{2\pi \epsilon_2} \ln(r_0) + \frac{\tau_1^*}{2\pi \epsilon_2} \ln(c) + \frac{\tau_2}{2\pi \epsilon_2} \ln(b) \right] + c_2 \quad (8)$$

где  $c_2$  - результирующая для среды с  $\epsilon_2$  постоянная интегрирования.

Непрерывность потенциала на границе раздела сред предполагает равенство постоянных интегрирования  $c_1$  и  $c_2$ . С учетом этого, выражение для емкости рассматриваемого МЭП примет вид

$$C_0 = \frac{2\pi \cdot \tau \cdot \epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 \left[ \tau^* \ln(r_0) + \tau_1^* \ln(c) + \tau_2 \ln(b) \right] - \epsilon_2 \left[ \tau \ln(r_0) + \tau_1 \ln(a) + \tau_2^* \ln(b) \right]} \quad (9)$$

В соответствии с принципом наложения, напряженность электрического поля в той или иной точке в окрестностях электродной системы будет определяться по одной из расчетных моделей (рис. 3б или 3в, в зависимости от местонахождения точки) как векторная сумма трех электрических напряженностей, обусловленных каждым из осевых зарядов в отдельности. При этом величины и направления этих напряженностей должны определяться по соотношению (4).

Важнейшим для практических задач является случай, когда одна из сред - идеаль-

ный диэлектрик ( $p \rightarrow \infty$ ). По электроду протекает синусоидальный ток, амплитуда и фаза которого изменяются по длине за счет оттока в среду по закону  $i(x) = i(o)e^{-\gamma x}$ , где  $\gamma$  - постоянная распространения. Компоненты комплексных напряженностей электрического и магнитного полей  $\vec{E}, \vec{H}$  во всех областях удовлетворяют волновому уравнению, а общие выражения для них, в случае электрода в однородной среде, приведены в [14] с подробными пояснениями относительно вывода формул и смысла вводимых параметров. В решаемой задаче на ЭМП уединенного электрода накладывается вторичное поле, обусловленное наличием вблизи него границы раздела двух сред. Поэтому напряженность электрического поля в среде 2 представляется в форме

$$\vec{E}_2 = \vec{E}_2^{(0)} - \vec{E}_2^{(sm)}, \quad (10)$$

где  $\vec{E}_2^{(0)}$  - напряженность первичного поля (поля в однородной среде);  $\vec{E}_2^{(sm)}$  - напряженность вторичного поля.

#### К численному исследованию задач расчета электродов

В настоящее время для теории ЭМП характерен учет влияния множества факторов и усложнение картины протекания физических процессов, поскольку только при этих условиях возможно решить проблему создания и повышения эффективности новых электротехнологических машин. И в этой связи весьма актуальной продолжает оставаться задача исследования ЭС ЭТК с позиций теории ЭМП, задачи которой в большинстве случаев можно свести к решению краевой задачи для дифференциального уравнения второго порядка в частных производных. Причем часто такая задача не имеет точного аналитического решения, а для некоторых задач можно найти приближенное решение. Известно, что одним из распространенных аналитических методов решения дифференциальных уравнений в частных производных является метод разделения переменных (называемый также методом Фурье).

С появлением мощных вычислительных средств и программного обеспечения используются методы математического моделирования ЭМП ЭС ЭТК с помощью специальных программных пакетов. Математическую модель ЭМП ЭТК можно получить аналитическими и численными методами. Известно, что аналитические методы расчета ЭМП применимы для решения задач в областях простой

геометрии ЭС с постоянными электрофизическими свойствами биологических, воздушных, почвенных и конструкционных сред. Реальные ЭС имеют сложную конфигурацию из материалов с неоднородными характеристиками [18]. Поэтому для решения практических задач применяют численные методы, которые основаны на дискретизации расчетной области ЭМП и за счет соответствующих аппроксимаций уравнений и граничных условий дифференциальная краевая задача сводится к системе алгебраических уравнений.

Известно, что при математическом анализе ЭМП необходимо решать уравнения Максвелла совместно с материальными уравнениями при заданных начальных и граничных условиях. Для этих целей можно использовать методы конечных разностей и конечных элементов [19, 20], в которых дискретизации подвергается искомая расчетная функция, при этом свойства биологических, почвенных, воздушных и конструкционных сред остаются неизменными. В основе решения уравнений в частных производных методом конечных разностей [20] лежит конечно-разностная аппроксимация производных, т.е. дифференциальные уравнения, граничные и краевые условия заменяются разностными операторами. В методе конечных элементов [19] расчетная область разбивается на элементы, а искомая величина аппроксимируется для каждого элемента полиномом, который определяется с помощью узловых значений этой величины. В обоих случаях решение сводится к определению значения искомой функции в дискретных точках расчетной области - узлах сетки или элемента. Для обоих методов реализация граничных условий связана с трудностями, поскольку приходится модифицировать используемые сетки, включая в них дополнительные узлы на границе раздела сред, затем, в первом случае, дописывать для каждого узла конечно-разностные операторы, во втором, использовать различные криволинейные элементы. Кроме того, указанные методы плохо приспособлены для расчета сред с неоднородным или анизотропным распределением параметров. Трудности при реализации этих методов возникают и при анализе ЭМП в движущихся средах, что соответствует технологии электрокультивации.

Наличие воздушной среды, почвы и биоткани, обуславливает существование трехмерного ЭМП в МЭП. Это явление определяет так называемую электромагнитную прозрачность растительных тканей, воздуха и

почвы. Для расчёта трёхмерного ЭМП также можно использовать специальную программу, основанную на методе граничных элементов. В растительных тканях стеблей и корней распределение тока высокой частоты ЭМП (от 10 кГц до 10 МГц) может быть описано с помощью поверхностной плотности тока из-за малой глубины проникновения ЭМП в проводящие ткани растения. Помимо распределения ЭМП в ЭС программа способна рассчитывать интегральные параметры, такие как полная мощность в частях системы.

С высокой степенью точности растения могут рассматриваться как осесимметричные. Поэтому с целью последующего анализа ЭМП рассчитывается для осесимметричной модели. В пределах этой модели, разделённые на сегменты ткани стеблей и корней описываются с помощью квазисимметричной модели. С помощью метода конечных элементов вычисляются распределение температуры и движение жидкости в тканях при тепловых потерях и электродинамических силах. Оба поля связаны через конвективный тепловой поток, электромагнитные силы и силы выталкивания. Кроме того, может быть учтена зависимость свойств материалов от температуры, что позволяет анализировать форму электродов.

С помощью программных пакетов можно изучить влияние свойств биологической, воздушной, почвенной и конструктивной сред на параметры ЭС, по рассчитанным ЭМП и температурным полям сделать важные выводы относительно электрического КПД системы, устойчивости и качества электротехнологического процесса. Удельные характеристики ЭМП в МЭП определяются, исходя из используемых частот, материалов и геометрии ЭС. Из-за относительно высокой электрической проводимости растительных тканей и почвы можно пренебречь токами смещения. Кроме того, предварительная оценка показывает, что напряжённость конвективного наведенного электрического поля на порядок меньше, чем напряжённость локального наведенного электрического поля. Таким образом, можно игнорировать влияние внутренних ЭМП в тканях и почве на внешние. Отсутствие этой связи упрощает вычисления.

Для рассмотрения различных трёхмерных эффектов можно использовать трёхмерную модель. В случае ярко выраженного поверхностного эффекта можно построить трёхмерную модель с математическим описанием ЭМП на поверхностях рассматриваемой системы. Геометрия ЭС ЭТК неразрывно

связана с ЭМП. Так как определение поверхности электродов может происходить только итеративно, должен быть разработан эффективный метод вычисления. В этом случае удобны расчёты в двух измерениях. Поверхностные токи раскладываются на отдельные кольцеобразные, следовательно, вычисление поверхностного распределения тока сводится к вычислению линейных токов. Для этой цели должно быть сделано отдельное описание секционированного электрода, чтобы как можно более точно определить трёхмерную конфигурацию ЭМП.

В заключение можно отметить, что наиболее удобными инструментами для решения конкретной задачи являются программные комплексы, основанные на методах конечных элементов или конечных разностей, например Femlab и Elcut. Для моделирования ЭМП в объеме целесообразно использовать Femlab, а на плоскости - Elcut. Современные пакеты прикладных программ, основанные на методе конечных элементов (NASTRAN, ANSYS, COSMOS/M), реализуют технологию этого метода для решения задач электротехнологий, в т.ч. и электрокультивации. Для формирования достоверных представлений об ЭМП ЭС ЭТК необходимо осуществлять исследование на физической модели. После решения расчетной задачи для измерения ЭМП в точках, удаленных от электродов, необходимо определить их потенциал и в начале опытов исследовать однородную среду на предмет изменения потенциала её точек от ЭМП "точечного" электрода. Конечной задачей является измерение потенциала точек, расположенных в пространстве, на которое воздействует ЭМП трёхфазной ЭС ЭТК. Методикой исследований предлагается использовать резервуар, наполненный составом близким по электрофизическим свойствам к почве, располагать в нем электроды ЭТК и измерять потенциал точек этого состава.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Медведев С.С. Электрофизиология растений: Учебное пособие/С.С. Медведев. – СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 1998. – 184 с.
2. Ляпин В.Г. Оборудование и энергосберегающая электротехнология борьбы с нежелательной растительностью/В.Г. Ляпин; Новосиб. гос. аграр. ун-т. - Новосибирск, 2000. – 106 с.
3. Ляпин В.Г. Оборудование и энергосберегающая электротехнология борьбы с нежелательной растительностью в приложениях/В.Г. Ляпин; Новосиб. гос. аграр. ун-т. - Новосибирск, 2000. – 240 с.
4. Ляпин В.Г. Электроды и электродная система электрокультиваторов/В.Г. Ля-

## К ПАРАМЕТРАМ И ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЭЛЕКТРОДНОЙ ТЕХНИКИ

пин//Механизация сельскохозяйственного производства в начале XXI века: Сб. науч. тр./Новосиб. гос. аграр. ун-т. Инж. ин-т. - Новосибирск, 2001. - С. 216-223.

5. Баев В.И. Электроимпульсная предуборочная обработка растений подсолнечника и табака: Монография/В.И. Баев, И.Ф. Бородин; Волгогр. с.-х. акад. – Волгоград, 2002. – 232 с.

6. Ляпин В.Г. Съем электрофизической информации растительных тканей и почвы. Специфика измерений/В.Г. Ляпин, А.В. Фотьев// Информационные технологии, информационные измерительные системы и приборы в исследовании сельскохозяйственных процессов. Ч. 2. Материалы Междунар. науч.-практ. конф. "АГРОИНФО-2003" (Новосибирск, 22-23 октября 2003 г.). Рос. акад. с.-х. наук. Сиб. отд-ние. - Новосибирск, 2003. - С. 305-310.

7. Николенко, С.В.. Новые электродные материалы для электроискрового легирования/С.В. Николенко, А.Д. Верхотуров. – Владивосток: Дальнаука, 2005. – 219 с.

8. Баранов Л.А. Светотехника и электротехнология/Л.А. Баранов, В.А. Захаров. - М.: КолосС, 2006.

9. Орлов, Ю.Н. Электроды для измерения биоэлектрических потенциалов: Учеб. пособие/Ю.Н Орлов. Под ред. И.С. Щукина. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2006. – 224 с.

10. Ляпин В.Г. Электрод в электротехнологиях и ЭМП протяженного проводника/В.Г. Ляпин//Современные и перспективные технологии в АПК Сибири: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. (Новосибирск, 8-9 июня 2006 г.)/Новосиб. гос. аграр. ун-т. Инж. ин-т. - Новосибирск, 2006. - С. 149-153.

11. Ляпин В.Г. Геометрия и сопротивление системы "электрод-почва" электротехнологического культиватора/В.Г. Ляпин//Перспективы и направления развития энергетики в АПК: материалы международной научно-технической конференции (Минск, 22-23 ноября 2007 г.)/М.А. Прищепов [и др.]; под ред. М.А. Прищепова. – Мн.: БГАТУ, 2007. - С. 253-256.

12. Ляпин В.Г. Функции элементов и требования к узлам электротехнологических культивато-

ров /В.Г. Ляпин//Электротехника, электромеханика и электротехнологии ЭЭЭ-2007: материалы третьей научно-технической конференции с международным участием/под ред. В.В. Панкратова. - Новосибирск: изд-во НГТУ, 2007. - С. 217-224.

13. Ляпин В.Г. Контактная область электродов электротехнологических культиваторов/В.Г. Ляпин, А.Н. Зенин//Инженерно-техническое обеспечение технологических процессов в агропромышленном комплексе Сибири: сб. науч. тр./РАСХН. Сиб. отд-ние. ГНУ СибИМЭ. - Новосибирск, 2007. - С. 118-126.

14. Слышалов В.К. Электромагнитное поле протяженного заземлителя, проложенного параллельно границе раздела воздух-грунт/В.К. Слышалов, Ю.А. Киселева//Вестник ИГЭУ. 2005. Вып. 1. - С. 62-69.

15. Карякин Р.Н. Электромагнитные процессы в протяженных заземлителях в неоднородных структурах/Р.Н. Карякин//Электричество. 1996. №7. - С. 43-51.

16. Костенко М.В. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения/М.В. Костенко, Л.С. Перельман, Ю.П. Шкарин. - М.: Энергия, 1973. – 272 с.

17. Литвинов Б.В. Теоретические основы электротехники. Исследование стационарных электромагнитных полей/Б.В. Литвинов; Новосибир. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2000. - 45 с.

18. Ляпин В.Г. Электромагнитное поле мобильных электротехнологических культиваторов/В.Г. Ляпин//Электротехника, электромеханика и электротехнологии ЭЭЭ-2005. Материалы второй научно-технической конференции с международным участием/Под ред. Н.И. Щурова. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. - С. 50-53.

19. Соловейчик Ю.Г. Метод конечных элементов для решения скалярных и векторных задач: учебное пособие/Ю.Г. Соловейчик, М.Э. Рояк, М.Г. Персова. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. - 895с.

20. Гельфонд А.О. Исчисление конечных разностей: учебное пособие для университетов/А.О. Гельфонд. - Изд. 4-е, стер. - М.: КомКнига, 2006. – 373 с.