УДК 631.171+631.55+631.348

ОБОСНОВАНИЕ РОДА ТОКА ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ РАСТЕНИЙ

В.И. Баев, И.В. Юдаев, доктора технических наук
И.В. Баев, старший преподаватель
ФГБОУ ВПО Волгоградский ГАУ, г. Волгоград

На примерах электрической обработки растений подсолнечника, табака и различных сорняков теоретически и экспериментально установлено, что для достижения летального повреждения объектов следует использовать наиболее эффективный импульсный род электрического тока.

Род электрического тока, энергия, импульсный, синусоидальный, половина периода, эквивалентный, степень повреждения.

Постановка проблемы. Электрическое воздействие на растения можно осуществлять с целью стимуляции их роста, развития, повышения урожайности и с целью достижения летального повреждения для ускорения созревания, сушки, увеличения сокоотдачи, уничтожения сорняков и т.д. [1]. При этом само действие может производиться различными видами электрических и магнитных полей, различными видами и стадиями электрических разрядов, и разнородными электрическими токами: постоянным, импульсным, переменным синусоидальным, переменным несинусоидальным токами с использованием электроискрового разряда и без него и т.д.

Цель исследований – выявить наиболее эффективный, с энергетической и технологической точек зрения, вид элетрического тока для воздействия на растения. Решение этой задачи рассмотрим на примере электрической обработки с целью получения летального повреждения ткани растений подсолнечника и табака для ускорения созревания и сушки семянок и листьев и сорных растений для их уничтожения.

Методика и результаты исследований. Поскольку взаимодействие любого повреждающего фактора с растительным объектом [2], носит энергетический характер, то за критерий оценки эффективности родов тока в работе принято количество выделяющейся в растительной ткани энергии. Все варианты воздействия разными родами токов должны быть энергетически равными. Это означает, что к одинаковым образцам стеблей растений должны подводиться одинаковые количества энергии разными родами токов и сравниваться при этом должны выделившиеся в тканях энергии: больше количество энергии – эффективнее род тока.

Для проведения сравнения воспользуемся известной [3] эквивалентной электрической схемой замещения и электропроводными свойствами и параметрами растительной ткани [2, 3].

Из-за наличия в схеме замещения растительной ткани электрической емкости и из-за возможной поляризации рабочих электродов постоянный ток

будет менее эффективен, чем переменные и импульсные токи, особенно в начале обработки, когда емкостные свойства клеточных мембран еще не нарушены. Поэтому далее сравниваем только два рода токов: импульсный и переменный синусоидальный. Переменный несинусоидальный ток из-за сходства с синусоидальным, многообразия возможных вариантов и относительной сложности их получения не рассматриваем.

В качестве расчетного взят импульс напряжения, который можно получать на экспериментальной установке и который затем можно использовать для опытной проверки теоретических выводов.

Сравнение проведено по двум основным вариантам: 1) импульс напряжения и синусоидально изменяющееся эквивалентное ему напряжение за половину периода, равную длительности импульса (рис. 1); 2) синусоидальное напряжение за половину периода на частотах, например, 50 и 400 Гц и эквивалентные ему в сумме несколько импульсов напряжения (рис. 2).

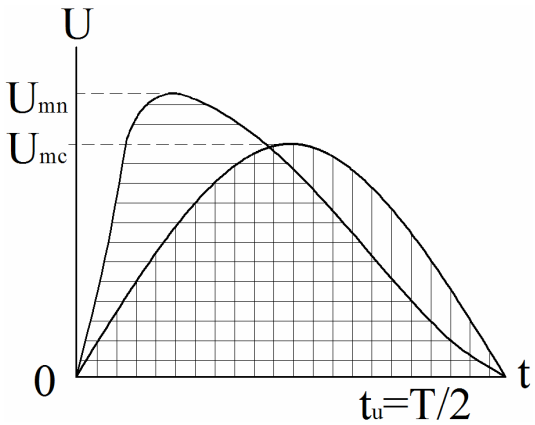

Рис. 1. Эквивалентные импульс напряжения и синусоидально изменяющееся напряжение за половину периода, равную длительности импульса

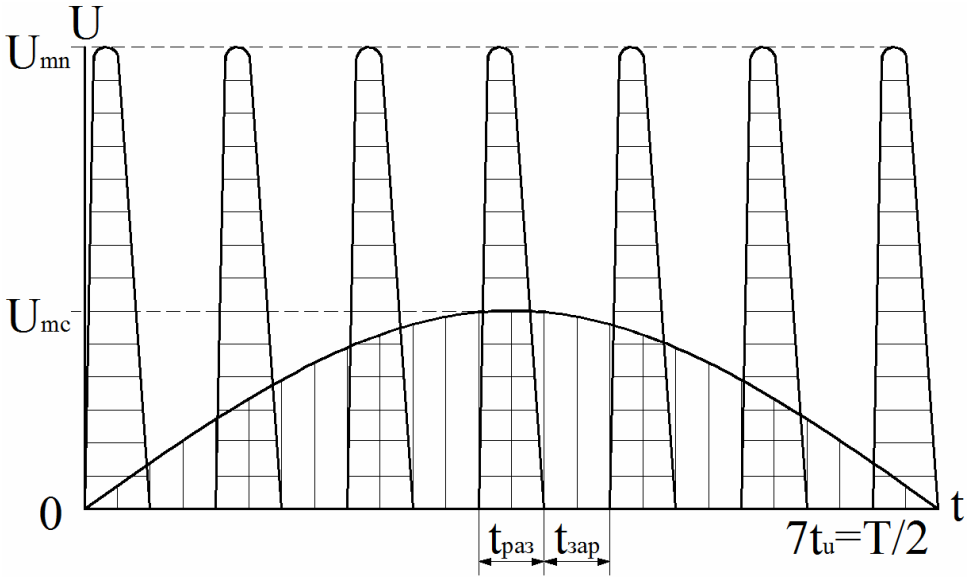

Рис. 2. Полупериод синусоидального напряжения и эквивалентные ему в сумме импульсы напряжения

За критерий энергетически равного воздействия импульса напряжения и синусоидального напряжения за половину периода принято равенство действующих значений напряжений этих родов тока. Так для первого варианта сравнения (рис. 1) действующие значения, при одинаковой $4{,}5\cdot10^{-6}$ с длительности, будут

$$U_u = \sqrt{\frac{\sum_1^k u_i^2 \cdot \Delta t_i}{t_u}}; \qquad U_C = \frac{U_{m_C}}{\sqrt{2}}.$$

Исходя из их равенства, амплитудное значение напряжения синусоидальной формы может быть вычислено по формуле

$$U_{m_C} = \sqrt{2\frac{\sum_1^k u_i^2 \cdot \Delta t_i}{t_u}} = 2\sqrt{\frac{\sum_1^k u_i^2 \cdot \Delta t_i}{T}}. \qquad (1)$$

Поглощенные растительной тканью энергии определим выражениями для импульсного воздействия

$$W_u = \frac{\sum_1^k u_i^2 \cdot \Delta t}{R_u} \quad \text{и} \qquad (2)$$

для воздействия синусоидальным напряжением за половину периода

$$W_C = \frac{1}{R_C}\int_0^{T/2} U_{m_C}^2 \cdot \sin^2 \omega t \cdot dt = \frac{U_{m_C}^2 \cdot T}{4R_C}. \qquad (3)$$

Здесь сопротивления R_u и R_c являются эквивалентными сопротивлениями ткани за время действия, соответственно, импульса напряжения и синусоидального напряжения. Величина R_u рассчитана по экспериментальным осциллограммам тока и напряжения на ткани [2] и равна 190 Ом. Из осциллограмм по (1) находим, что U_{mc}=7,81 кВ.

По экспериментальной вольтамперной характеристике растительной ткани подсолнечника [2], для среднестатистического диаметра стебля подсолнечника в месте обработки 15 мм, находим эквивалентное сопротивление стебля R_c=280 Ом.

Вычисления по (2) и (3) дают значения W_u=0,8 Дж и W_c=0,47 Дж. Эти величины показывают, что импульсное воздействие на растительную ткань эффективнее воздействия синусоидальным напряжением в 1,7 раза.

Практический интерес представляет сравнение результатов начального воздействия этих родов токов на живую растительную ткань, когда еще не нарушены емкостные свойства ее клеточных мембран. В этом случае сопротивление ткани можно определить как входное сопротивление ее эквивалентной схемы замещения.

А используя те же выражения (2) и (3), получаем W_u=0,02 Дж и W_c= 0,0177 Дж, т.е. и в начале обработки импульсное воздействие эффективнее синусоидального на 13 %.

Для второго варианта сравнения (рис. 2) примем длительность воздействия на ткань равной половине периода синусоидального напряжения на

какой-то низкой стандартной частоте *f*, например, 50 Гц или 400 Гц. Такие частоты следует рассмотреть из-за относительной легкости практического осуществления метода на стандартном силовом оборудовании, поскольку и генераторы и трансформаторы небольшой мощности на такие частоты выпускаются промышленностью.

За время половины периода принятой частоты на ткань окажут воздействие *m* таких же как в первом варианте импульсов

$$m = \frac{T/2}{t_{зар} + t_{раз}}. \qquad (4)$$

Для этих импульсов действующее значение напряжения будет

$$U_u = \sqrt{\frac{\sum_1^k u_i^2 \cdot \Delta t_i}{t_{зар} + t_{раз}}}. \qquad (5)$$

Для эквивалентной синусоиды (рис. 2) действующее значение должно быть таким же, а ее амплитуда составит

$$U_{m_C} = \sqrt{2} U_u = \sqrt{\frac{2\sum_1^k u_i^2 \cdot \Delta t_i}{t_{зар} + t_{раз}}}. \qquad (6)$$

Исходя из величин емкости экспериментального разрядного контура и энергии единичного импульса, длительности разряда и скорости деионизации искрового канала и продолжительности заряда конденсаторов наибольшая частота разрядов в контуре составляет $5{,}6 \cdot 10^3$ Гц и $T_u = t_{зар} + t_{раз} = 180 \cdot 10^{-6}$ с.

При стандартной частоте сравниваемой синусоиды f=50 Гц за половину периода по (4) произойдет m = 55 – 56 разрядов. Амплитуда синусоидального напряжения по (5) и (6) будет 1310 В. Средняя напряженность в стебле растения составит: $E = \frac{U_{m_C}}{d_{ст}} = \frac{1310}{15} \approx 87$ В/мм.

Экстраполяцией в.а.х. растительной ткани [2] по полученной напряженности найдем ток $i \approx 81 \cdot 10^{-3}$ А. Откуда эквивалентное за разряд сопротивление R_c=1074 Ом.

Выделившаяся в ткани энергия от синусоидального напряжения за 0,01 с по (3) составит 7,87 Дж. А суммарная энергия от 55 импульсов за такое же время будет 44,4 Дж, т.е. в 5,6 раза больше.

Если сравнивать воздействия импульсным напряжением и синусоидальным напряжением частотой 400 Гц, то получим значения: $T_c/2$=0,00125 с; m=7 разрядов; $7W_u$=5,6 Дж; W_c=0,98 Дж. Т.е. и при воздействии синусоидальным напряжением частотой 400 Гц в растительной ткани выделяется примерно в 5,7 раза меньше энергии, чем при обработке растительной ткани импульсным напряжением.

Здесь необходимо отметить, что в действительности наибольшее значение отношения выделившихся энергий W_u и W_c будет меньше вычисленного, поскольку за эквивалентные сопротивления объекта для упрощения расчетов приняты средние сопротивления. Фактически же

сопротивление является функцией выделяющейся в ткани энергии. Кроме того, изменение амплитуды синусоидального напряжения, вероятно, приводит к изменению интенсивности повреждающего фактора растительной ткани, что в приведенных рассуждениях не учитывалось.

Таким образом, из приведенного теоретического анализа следует, что электрическая обработка растительных объектов разрядными импульсами напряжения эффективнее воздействия энергетически равным синусоидальным напряжением.

Экспериментальная проверка сделанного вывода проводилась сравнением степеней повреждения одинаковых стеблей растений подсолнечника от воздействия синусоидальным напряжением амплитудой 1310 В за половину периода при частоте 50 Гц и 55-тью импульсами напряжения амплитудой 9,16 кВ и длительностью $4{,}5\cdot10^{-6}$ с. Такая методика основана на экспериментально проверенном предположении, что степень повреждения растительной ткани пропорциональна количеству поглощенной энергии.

Под степенью повреждения S_n растительной ткани понимается величина, численное значение которой равно отношению активной составляющей полного сопротивления ткани до обработки к сопротивлению ткани после обработки на фиксированной частоте измерительного тока, в нашем случае на частоте f = 10 кГц [4].

Стебель растения фиксировался между электродами, имея с ними непосредственный контакт. Половина периода синусоидального напряжения подводилась к стеблю с помощью специально разработанной схемы в которой роль ключа, замыкающего цепь с растительным объектом, выполнял управляемый шаровой искровой промежуток [2]. Длительность разряда в этом промежутке была 0.01 с.

Обработка стеблей разрядными импульсами напряжения производилась от генератора импульсов высокого напряжения (ГИН) с регулируемыми амплитудой и энергией импульсов. Методика изложена в [2], где описана и методика измерения степени повреждения растительной ткани.

Результаты экспериментов приведены в таблице 1 (как пример) и на рисунке 3.

1. Экспериментальная эффективность родов тока

Род тока	Длительность воздействия	Амплитуда напряжения, кВ	Действующее напряжение, кВ	Повторность	Степень повреждения, о.е.	Соотношение степеней повреждения
Импульсный	55 имп. по $4{,}5\cdot10^{-6}$ с	9,16	0,928	6	$S_{пи}$=1,5	$\frac{S_{ПИ}}{S_{ПС}}=1{,}3$
Синусоидальный, f=50 Гц	0,01 с	1,308	0,928	6	$S_{пс}$=1,15	

В таблице 1 даны основные параметры единичных энергетически равных воздействий на стебли растений табака в поперечном направлении импульсным и синусоидальным напряжениями.

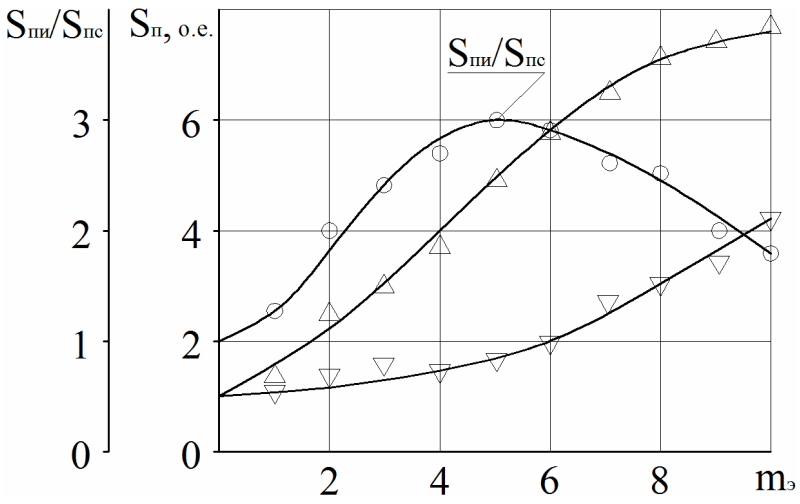

Рис. 3. Зависимости степеней повреждения растительной ткани при воздействии импульсным и синусоидальным напряжениями и их отношения от числа $m_э$ единичных энергетически равных воздействий

На рис. 3 приведены зависимости эффективности импульсного и синусоидального частотой 50 Гц токов от числа $m_Э$ единичных энергетически равных воздействий на те же растения.

Поскольку энергии обработки растений пропорциональны числу воздействий, то зависимости степени повреждения ткани $S_{пи}$ и $S_{пс}$ от числа $m_Э$, обе имеют S-образный характер. Однако для синусоидальной формы воздействующего напряжения степень повреждения $S_{пс}$ существенно смещена в область большего числа (примерно в два раза) единичных воздействий. Примерно на такое же число воздействий позже $S_{пс}$ достигнет своего максимального значения по сравнению с $S_{пи}$ (за пределами правой части рисунка). Поэтому очевидно, что отношение степеней повреждения $S_{пи}$ к $S_{пс}$ в начале и в конце обработки численно равно единице, а в средней части зависимости от $m_Э$ имеет выраженный максимум: когда повреждения нет, то $S_{пи}=S_{пс}=1$ и в конце предельной обработки для обоих вариантов тока степени повреждения имеют одинаковую максимальную величину и их отношение равно единице.

Наибольшее различие между степенями повреждения $S_{пи}$ и $S_{пс}$ и наибольшее значение их отношения зависят от физиологического развития и состояния стеблей растений, от их геометрических размеров и т.д. То есть численные значения во всех трех зависимостях будут разными от растения к растению, но их характеры будут одинаковыми с рис. 3.

Из приведенного материала следует, что электрическая обработка растений подсолнечника и табака, с целью достижения их летального повреждения, разрядными импульсами напряжения эффективнее обработки переменным синусоидальным током, она позволяет полнее использовать потенциальные возможности источника питания.

Аналогичные исследования проведены для сорных растений. В качестве объектов обработки взяты отдельные фрагменты сорняков мари городской и щирицы запрокинутой.

При определении численных значений степени повреждения обрабатываемых растительных тканей сорных трав также ставилось условие, что количество подводимой к ткани энергии в сравниваемых вариантах должно быть одинаковым или крайне близким по значению. Для проведения опытов была разработана схема, позволяющая отсекать один, два и четыре периода напряжения синусоидального тока промышленной частоты и подавать его затем на вход повышающего трансформатора, обеспечивая в итоге воздействие на изучаемую растительную ткань. Для осуществления импульсной обработки трав использовался ГИН с регулируемыми параметрами разрядного контура [5].

Количество поглощаемой исследуемой тканью энергии оценивалось по следующим выражениям:

- для синусоидального воздействия:

$$W_c = \int_0^t u(t) \cdot i(t) dt = \int_0^t U_{mc} \cdot I_{m_c} \cdot \sin^2 \omega t \cdot dt \,, \qquad (7)$$

где U_{mc}, I_{mc} – амплитудное значение напряжения синусоидальной формы и тока, кВ и А; t – время, за которое рассматривается поглощение энергии, с; ω – угловая частота тока, рад/с.

- для высоковольтного импульсного воздействия:

$$W_{имп} = 0{,}5 \cdot k_p \cdot m \cdot C_k \cdot U_0^2 \,, \qquad (8)$$

где k_p – степень разрядки ёмкости (по напряжению), принимаемая 0,9 – 0,95; U_0 – начальное напряжение разрядного контура, прикладываемое к участку растительной ткани длиной l_{pm} и диаметром d_{pm}, кВ; C_k – емкость разрядного контура, Ф.

Проведенные в лабораторных условиях экспериментальные исследования с фрагментами стеблей сорных растений позволили получить следующие результаты (табл. 2).

2. Сравнительные показатели повреждения растительной ткани стеблей сорных растений, при синусоидальном и импульсном высоковольтном воздействии на них

Вид сорного растения	**Высоковольтное (U_{max} = 2 кВ) синусоидальное воздействие длительностью:**			**Высоковольтное импульсное (U_0 = 2 кВ) воздействие с числом импульсов m, при C_k = 1000 пФ:**		
	один период t=0,02 с	два периода t=0,04 с	четыре периода t=0,08 с	m= 200	m=400	m=800
Щирица запрокинутая	**Воздействующая энергия, Дж:**			**Воздействующая энергия, Дж:**		
	0,485	0,970	1,865	0,380	0,760	1,520
	Степень повреждения растительной ткани, о.е.			**Степень повреждения растительной ткани, о.е.**		

	1,47	2,03	2,46	3,72	4,13	4,75
Марь городская	**Воздействующая энергия, Дж:**			**Воздействующая энергия, Дж:**		
	0,394	0,857	1,701	0,380	0,760	1,520
	Степень повреждения растительной ткани, о.е.			**Степень повреждения растительной ткани, о.е.**		
	1,43	1,80	2,29	4,10	6,10	6,90

Из таблицы видно, что электроимпульсная обработка сорных растений технологически более эффективна по сравнению с обработкой высоким синусоидальным напряжением. Поэтому для технической реализации электрической прополки необходимо разрабатывать соответствующие импульсные схемные решения.

Выводы

Таким образом, для электрической обработки растений подсолнечника, табака и сорняков с целью достижения технологически необходимого их летального повреждения следует использовать наиболее эффективный импульсный род электрического тока.

Список литературы

1. Баев В.И. Результаты исследований электротехнологий на факультете электрификации сельского хозяйства [Текст] / В.И. Баев // Техника в сельском хозяйстве. – 2012. – № 2. – С. 4 – 5.

2. Баев В.И. Электроимпульсная предуборочная обработка растений подсолнечника и табака [Текст]: монография / В.И. Баев, И.Ф. Бородин. – Волгоград: Станица-2, 2002. – 230 с.

3. Руководство по цитологии [Текст]. / в 2-х томах. – М.-Л.: Наука, 1966. – С 572 и С 676.

4. Климов А.А. О некоторых электрофизических параметрах и свойствах растительной ткани как объекта электроискрового воздействия [Текст] / В.И. Баев, А.А. Климов, В.Н. Савчук // Электронная обработка материалов. – 1970. – № 1. – С. 66 – 71.

5. Юдаев, И.В. Электроимпульсная энергосберегающая технология борь-бы с сорной растительностью [Текст]: автореф. дис… докт. техн. наук / И.В. Юдаев. – Москва, 2012. – 36 с.

Examples of electrical processing of sunflower plants, tobacco, and various weeds theoretically and experimentally established that to achieve lethal damage objects should use the most effective pulse rod of an electric current.

Genus electric current, energy, pulsed, CW, half of the period equivalent to the degree of damage.