

# Характер изменения электропроводных свойств растительных тканей сорняков при электроимпульсном повреждении

И. В. Юдаев\*, Ю. В. Даус

ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный аграрный университет,  
г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, 196601, Россия \*e-mail: [etsh1965@mail.ru](mailto:etsh1965@mail.ru)

Поступила в редакцию 03.03.2021

После доработки 15.04.2021

Принята к публикации 19.04.2021

Рассмотрена одна из перспективных электротехнологий в сельском хозяйстве – электроимпульсная прополка нежелательной и сорной растительности. Такая операция имеет высокие показатели технологической эффективности, является экологически безопасной и относится к процессам высокотехнологического характера. Для практического применения и технической реализации изучены разнообразные электропроводные свойства и параметры объектов воздействия – сорных растений. В качестве основной изучаемой характеристики использована частотная зависимость электрического сопротивления растительной ткани или дисперсия этого сопротивления по частоте измерительного тока. Экспериментальные исследования позволили выяснить характер изменения сопротивления в процессе повреждения растительной ткани, что дополнительно дает возможность оценить и такие количественные показатели как энергия, поглощаемая растительной тканью, так и диапазоны варьирования ее сопротивления в процессе электроимпульсного воздействия на нее. Теоретическая проверка подтвердила качественную сходимость полученных результатов и их изменение в процессе повреждения с расчетными значениями.

*Ключевые слова:* электроимпульсная прополка, электрическая схема замещения растительной ткани сорняков, дисперсия импеданса растительной ткани по частоте, электроимпульсное повреждение растительной ткани, изменение электропроводных свойств растительной ткани

УДК 631.171+58.037+58.088

<https://doi.org/10.52577/eom.2021.57.5.78>

## ВВЕДЕНИЕ

Сегодня интенсивно внедряются разнообразные электротехнологические операции в такие отрасли экономики, как сельское хозяйство, пищевая и перерабатывающая промышленность, позволяя повысить технологическую эффективность, свести к минимуму экологическое негативное воздействие, добиться высокого качества и продовольственной безопасности готовых продуктов, а также производимых полуфабрикатов и сырья. Применение воздействий электрической природы позволяет стимулировать проращивание семян, собирать высокого качества урожай, бороться с вредной микрофлорой и болезнями при хранении растениеводческой продукции, увеличить выход готовой продукции, не снижая ее качества, обеззараживать и пастеризовать продукцию сельскохозяйственного производства, а также уничтожать сорную и нежелательную растительность, прореживать посеvy культурных растений [1–6]. При всем этом добиться максимальной эффективности в технологических процессах сельского хозяйства и при производстве продо-

вольствия можно, используя для этого высоковольтные импульсные воздействия электрической природы [6–11].

Одной из операций растениеводства, в которой необходимо существенно повысить уровень экологической безопасности, сократив до необходимого минимума использование ядохимикалиев, и добиться максимальной технологической эффективности, является борьба с сорными растениями. Именно применение электрических воздействий против нежелательной растительности в посевах и посадках культурных растений, а также при поддержании в чистоте паровых земель позволяет решить обозначенные проблемы и задачи [2, 6, 7].

Оценить повреждение и рассмотреть механизм потери сопротивляемости растительной ткани внешнему электрическому воздействию невозможно, не изучив сущности протекания процесса повреждения и не дав ответа на вопрос – как изменяются при этом электропроводные свойства обрабатываемого объекта растительного происхождения.

При продольной электрической обработке стеблей и корней сорных растений в электри-

ческую цепь протекания тока оказываются включенными их растительные ткани, состоящие из многочисленных клеточных структур, которые с электрической точки зрения составляют сложное – смешанное, по пути протекания тока, электрическое последовательно-параллельное соединение с включением в него как небольших по размеру поверхностных клеток, так и более массивных – внутренних. Эквивалентная схема замещения растительной ткани, состоящая из пассивных электрических элементов, характеризующих клеточные структуры, имеет, на первый взгляд, достаточно сложный и громоздкий вид. Но, на наш взгляд, конечный вариант электрической схемы замещения растительной ткани представляет собой соединение эквивалентных, суммарных активных сопротивлений и емкостей компонентов, замещающих отдельные элементы клеток, организующих упорядоченное их построение на участке протекания тока обработки. При этом после проведения алгебраической операции свертки многочисленных, используемых для анализа схем замещения отдельных растительных клеток, схема замещения растительной ткани по своей структуре будет представлять собой хорошо известную схему замещения единичной растительной клетки [12–16], которая количественно отличается только на значение некоторого «коэффициента свертки». Таким образом, можно утверждать, что разница между электрическими схемами замещения растительной ткани сорняков и растительной клетки заключается лишь в количественных значениях параметров элементов представленных моделей (см. рис. 1).

Полное электрическое сопротивление растительной ткани сорняков носит комплексный характер и определяется суммой его активной и реактивной (емкостной) составляющих:

$$Z(\omega) = \frac{R_2 \times \left[ R_1 + \frac{R_3 \times \frac{1}{j\omega \times C_m}}{R_3 + \frac{1}{j\omega \times C_m}} \right]}{R_2 + R_1 + \frac{R_3 \times \frac{1}{j\omega \times C_m}}{R_3 + \frac{1}{j\omega \times C_m}}} = R_{ex}(\omega) + jX_{ex}(\omega) =$$

$$= R_2 \times \frac{(R_1 + R_3) \times (R_1 + R_2 + R_3) + \omega^2 \times C_m^2 \times R_3^2 \times R_1 \times (R_1 + R_2)}{(R_1 + R_2 + R_3)^2 + \omega^2 \times C_m^2 \times R_3^2 \times (R_1 + R_2)^2} -$$

$$- j\omega \times C_m \times \frac{R_2^2 \times R_3^2}{(R_1 + R_2 + R_3)^2 + \omega^2 \times C_m^2 \times R_3^2 \times (R_1 + R_2)^2}. \quad (1)$$

Как видно из представленного аналитического выражения, импеданс и его состав-

ляющие зависят от изменения частоты измерительного тока ( $\omega$  – угловая частота тока), и при этом с ее ростом значения полного сопротивления и его активной компоненты плавно уменьшаются. Такая зависимость характерна для всех биологических тканей и в биофизике называется дисперсией импеданса по частоте измерительного тока. Характер ее поведения можно объяснить тем фактом, что неповрежденные биологические ткани содержат клеточные мембраны, обладающие емкостными свойствами [16, 17]. Электрическая емкость как элемент цепи определяется величиной омического сопротивления, которое обратно пропорционально частоте протекающего через нее тока. На низких частотах емкостное сопротивление велико и через этот элемент, в принципе, не может протекать электрический ток. В результате этого полное сопротивление будет иметь наибольшее значение:

$$Z_0 = R_0 = \frac{R_2 \times (R_1 + R_3)}{R_2 + R_1 + R_3} \rightarrow \max. \quad (2)$$

На высоких же частотах омическое сопротивление емкостного элемента уже близко к нулю, и оно выполняет роль элемента, шунтирующего активное сопротивление мембраны  $R_3$ . Поэтому на этих частотах значение импеданса минимально, и его можно определить как:

$$Z_\infty = R_\infty = \frac{R_2 \times R_1}{R_2 + R_1} \rightarrow \min. \quad (3)$$

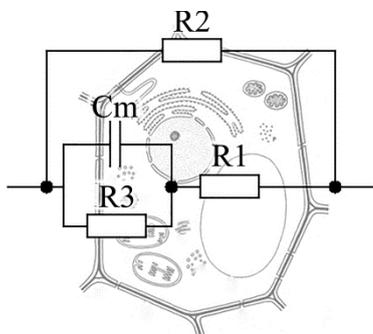
При изменении частоты от своего минимального значения к максимальному кривая зависимости полного сопротивления (то же самое можно сказать об активной его составляющей) плавно уменьшается практически пропорционально росту частоты измерительного тока. Также необходимо отметить, что именно такое поведение полного сопротивления или его активной составляющей характерно для принятой электрической эквивалентной схемы замещения растительной ткани (см. рис. 1).

Анализ выражения для реактивной составляющей полного сопротивления растительной ткани показывает, что представленная функция имеет экстремум, то есть кривая изменения величины реактивной (емкостной) составляющей  $X_{ex}$  от частоты измерительного тока будет иметь характерную колоколообразную форму с явно выраженным максимумом на частоте:

$$\omega_{\max} = \frac{(R_1 + R_2 + R_3)}{C_m \times R_3 \times (R_1 + R_2)}. \quad (4)$$

В проведенных исследованиях в качестве основной характеристики при анализе электро-

проводных свойств растительной ткани сорняков была принята вышеописанная зависимость полного сопротивления этой ткани (1), а для некоторых исследований активной или реактивной его составляющих – от частоты измерительного тока. Такой выбор, на наш взгляд, позволяет более качественно, наглядно и с достаточной степенью достоверности получать информацию о сорных растениях и их тканях как нагрузки электротехнологического агрегата. Также следует подчеркнуть, что именно эта зависимость, при помощи которой можно достоверно получить данные об электропроводных свойствах путем измерения с применением простых и доступных аппаратных средств, принята многими исследователями-биофизиками для изучения электрофизических свойств биологических клеток и тканей.



**Рис. 1.** Электрическая схема замещения растительной ткани сорняков:  $R1$  – суммарное активное сопротивление протоплазмы тех клеток, из которых состоит исследуемая растительная ткань;  $R2$  – суммарное активное сопротивление межклеточника для рассматриваемого участка растительной ткани;  $R3$  и  $Cm$  – эквивалентное суммарное активное сопротивление и емкость мембран всех клеток обрабатываемого участка растения.

Цель представленных исследований – анализ экспериментально полученных результатов, характеризующих изменение электропроводных свойств сорных растений при их электроимпульсном необратимом повреждении, и теоретическая проверка.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования по снятию зависимости сопротивления растительной ткани от частоты измерительного тока проводили по стандартной методике, описанной в работах [18, 19]. Схема измерения сопротивления образца сорного растения, являющаяся при проведении данных исследований частью экспериментальной лабораторной установки (см. рис. 2), состояла из низкочастотного генератора сигналов  $G$  с выходным напряжением 1 В и регулируемой частотой измерительного тока от 20 Гц до 200 кГц; мостовой схемы, в плечи сравнения которой включены малоин-

дуктивные сопротивления  $R6$ – $R8$ , а в измерительное плечо с помощью электродов – участок сорного растения; выпрямительной схемы на диодах  $VD$  3–6 и цифрового мультиметра  $\mu A$  в качестве нуль-индикатора. Погрешность измерения сопротивления оценивали по измерению образцовых лабораторных сопротивлений на всех выбранных частотах измерительного тока, она не превышала значения в 10%.

Для проведения обобщенного качественного анализа было принято решение воспользоваться удельным значением активного сопротивления растительной ткани. Такой подход позволяет учесть зависимость сопротивления конкретного образца изучаемого участка сорного растения от его формы и геометрических размеров.

Установка подключалась к сети переменного напряжения, необходимое значение которого на входных зажимах схемы устанавливалось с помощью однофазного регулятора напряжения  $TV1$ . Для визуального контроля за значением питающего напряжения использовали цифровой вольтметр  $\mu V1$ . В качестве источника высокого постоянного напряжения применялся прошедший поверку стандартный аппарат для высоковольтных испытаний АКИ-50, на выходе которого можно получить напряжение до 50 кВ включительно.

В качестве накопительных емкостей разрядного контура генератора импульсного напряжения (ГИН) использовались высоковольтные керамические конденсаторы постоянной емкости. Для получения различного значения электрической энергии, необходимой для обработки образцов сорных растений, емкость батареи изменялась переключением в ней числа конденсаторов. В качестве ограничителя зарядного тока применялся резистор  $R1$ .

Важную роль в ГИН играют искровые разрядники, которые выполняют функцию коммутатора и осуществляют переключение конденсаторов с режима заряда на режим разряда. От их устойчивой работы зависит стабильность амплитуды выходных импульсов генератора. Для управления моментом разряда в ГИН, а также для подсчета количества импульсов, воздействующих на растительную ткань исследуемых сорняков, использовался управляемый искровой разрядник  $SF1$ , который был собран на основе двух шаровых электродов диаметром 50 мм, изготовленных из нержавеющей стали, с отшлифованными поверхностями. Момент подачи пускового импульса соответствовал окончанию времени зарядки конденсаторов ГИН. Схема управления шаровым разрядником была собрана с использованием

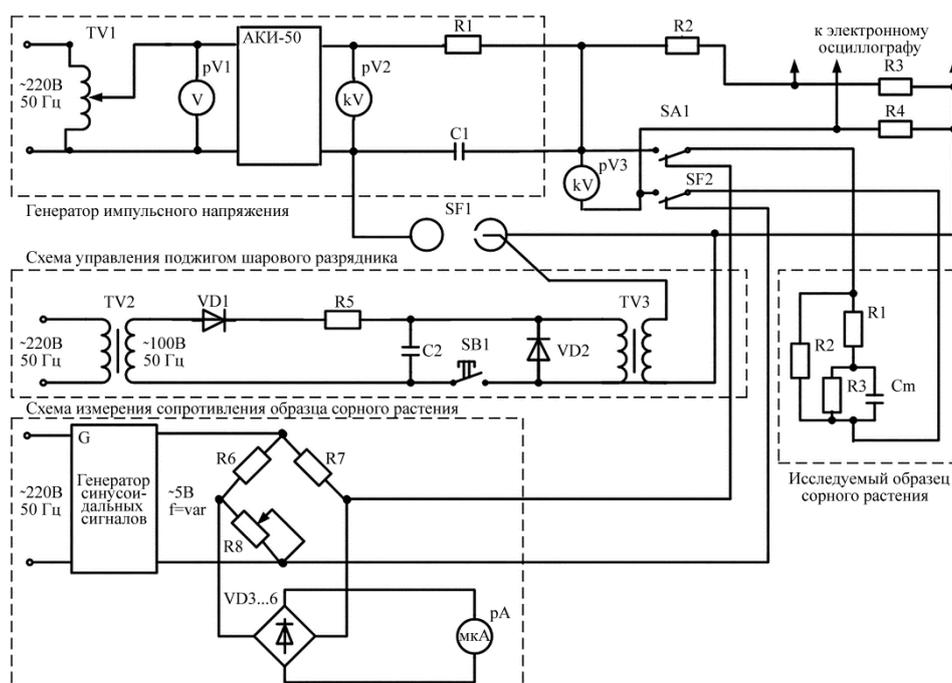


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема лабораторной экспериментальной установки.

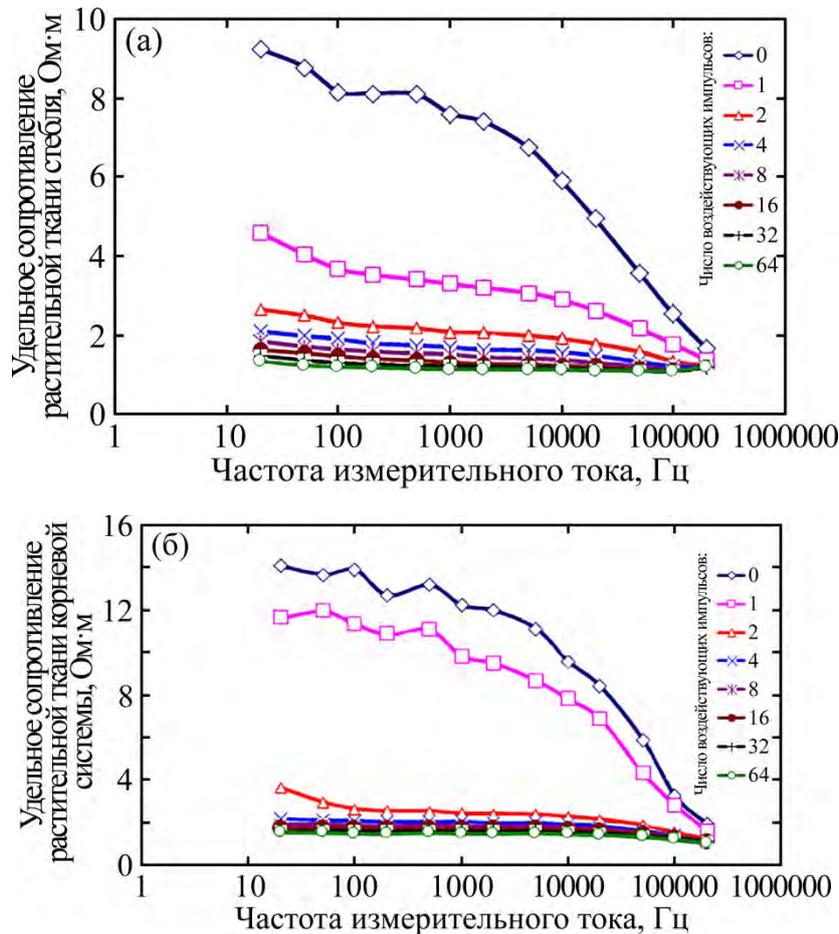
импульсного трансформатора TV3, в роли которого выступала автомобильная катушка зажигания (см. рис. 2). Принцип работы схемы состоит в следующем: со вторичной обмотки понижающего стандартного трансформатора TV2 снимается напряжение  $U = 100$  В, после этого осуществляется зарядка емкости C2 через сопротивление R5. Затем после замыкания кнопки SB1 емкость разряжалась на первичную обмотку катушки зажигания, и протекающий по ней ток в момент коммутации способствовал возникновению во вторичной обмотке импульса высокого напряжения. Создаваемое высокое напряжение пробивало промежуток между основным и поджигающим электродами нижнего шара, основной разрядный промежуток ионизировался, и в нем происходил основной разряд, в результате чего энергия, запасенная в накопительных емкостях C1 ГИН, прикладывалась к образцу растительной ткани. Диод VD2, включенный параллельно первичной обмотке катушки зажигания, выполнял роль шунта для предотвращения выхода катушки из строя.

Фрагмент части растительной ткани сорного растения находится в межэлектродном пространстве в рабочем разряднике, помещенном в разрядной камере. Electrodes выполняли роль и рабочих, и измерительных электродов и представляли собой подпружиненные стержни диаметром 7,5 мм из нержавеющей стали с проточками на концах, в которых крепились фетровые накладки. Для качественного контакта с растительными образцами поверхность фетровых накладок после каждого опыта смачивали 5% раствором NaCl. Гальваническая

развязка между разрядным контуром и измерительной схемой осуществлялась с помощью трехпозиционного воздушного переключателя. Разрядная камера, представляющая собой объемную прямоугольную конструкцию, внутри которой размещаются электроды, создавала затенение от естественного света, что позволяло визуально следить за тем, не происходит ли перекрытие искрового разряда по поверхности растительного образца, что было необходимо, так как технологическая эффективность уничтожения сорных растений зависит, прежде всего, от плотности тока, протекающего через растительную ткань, а не от разряда по поверхности. Все исследования проводились в помещениях с контурами заземления, общее сопротивление которых не превышало 0,5 Ом. Элементы схемы, подлежащие заземлению, соединялись короткими медными проводами с общим болтовым зажимом, который, в свою очередь, подсоединялся к выводу контура гибким проводом сечением 5,0 мм<sup>2</sup>.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сорняки обладают высокой приспособляемостью к неблагоприятным условиям произрастания и большой устойчивостью к разного рода воздействиям на них (в том числе и повреждающим), что отражается на их внутреннем морфологическом строении, и повышенной способностью к возобновлению их роста. Следовательно, эти характерные для сорняков особенности могут сказаться на их



**Рис. 3.** Характер изменения зависимости удельного активного электрического сопротивления растительных тканей стебля (а) и корня (б) осота розового по частоте измерительного тока при электроимпульсном повреждении. Удельная энергия одного импульса: для стебля  $W_{I_{y0}} = 1,23 \text{ Дж/см}^3$ ; для корня  $W_{I_{y0}} = 1,196 \text{ Дж/см}^3$ .

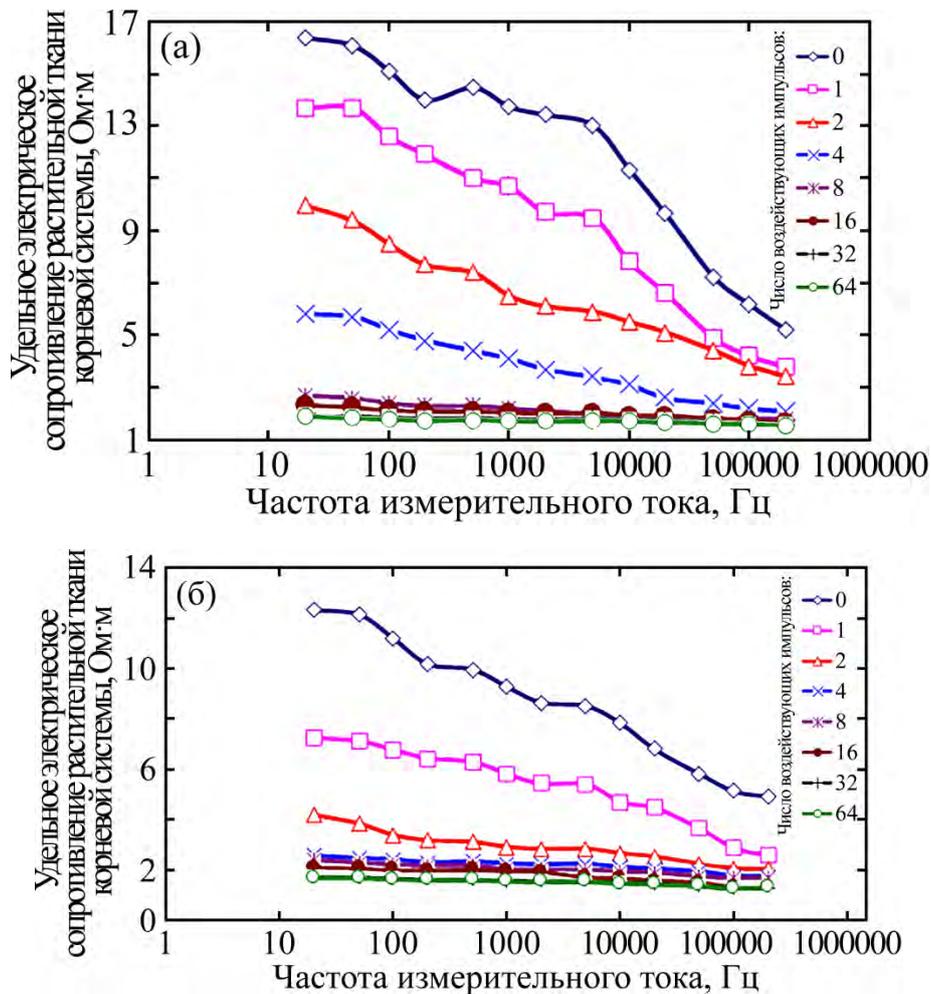
свойствах противостоять и электрическому повреждению.

Опыты по снятию кривых изменения удельного активного электрического сопротивления растительной ткани по частоте проводились с корнеотпрысковыми растениями: осотом розовым и осотом полевым в соответствии с вышеописанной методикой. Полученные зависимости для фрагментов стебля и корня осота розового, которые обрабатывались высоковольтными импульсами с энергией одного импульса  $W_{I_{y0}} = 0,276 \text{ Дж}$  при напряжении обработки  $U_0 = 8 \text{ кВ}$  и различной повреждающей дозой электрической энергии, представлены на рис. 3.

При электрическом повреждении растительной ткани характер изменения сопротивлений не меняется, но их численные значения снижаются. Это снижение происходит за счет уменьшения сопротивления растительной ткани на низких частотах при практически неизменном сопротивлении на высокой частоте (рис. 3). С увеличением степени повреждения (степени разрушения внутриклеточных структур) растительной ткани сопротивление, соответствующее

низким значениям частот, уменьшается, скорость изменения сопротивления по частоте падает и при полном повреждении значения сопротивлений на низких и высоких частотах практически выравниваются. Кривая в этом случае опускается до линии, соответствующей значению сопротивлений на высокой частоте, и трансформируется в прямую, параллельную оси абсцисс, или имеющую небольшой угол наклона к ней. Это обстоятельство как гипотезу можно объяснить исчезновением емкостных свойств растительной ткани, что происходит либо за счет уменьшения емкости клеточных мембран, либо за счет шунтирования мембранной емкости, возрастающей активной проводимости мембран.

Анализ полученных зависимостей дает возможность определить минимальную дозу электрической энергии, которой будет достаточно для гибели тканей корня и стебля осота розового. Так, в проведенных исследованиях полное повреждение у тканей стеблей будет достигнуто, если надземная часть растения обрабатывается электрической энергией, удельное значение которой лежит в пределах  $W_{\Sigma y0} = 2,35\text{--}3,14 \text{ Дж/см}^3$ ; а у тканей корневой



**Рис. 4.** Зависимость удельного электрического сопротивления растительных тканей корня осота полевого по частоте измерительного тока при электроимпульсном повреждении. Удельная энергия одного импульса для растительной ткани корневой системы в первом варианте (а) равна  $W_{1y0} = 0,65 \text{ Дж/см}^3$ ; а во втором (б) –  $W_{2y0} = 1,21 \text{ Дж/см}^3$ .

системы –  $W_{\Sigma y0} = 4,8\text{--}6,15 \text{ Дж/см}^3$ . Такая разность позволяет предположить, что для уничтожения корневой системы корнеотпрысковых растений придется затратить почти в два раза больше энергии, чем при повреждении надземной части.

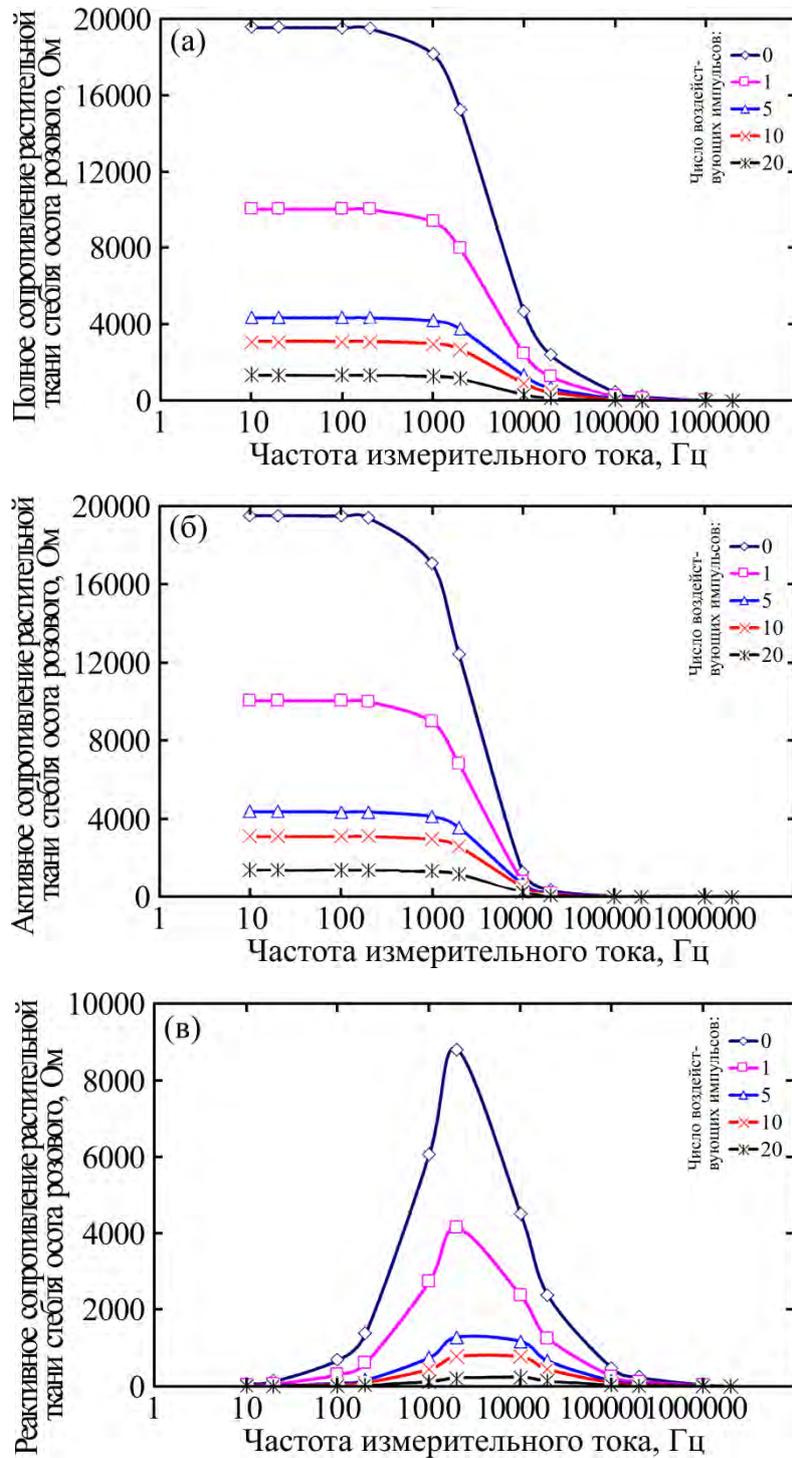
Интенсивность спада кривых изменения удельного активного сопротивления растительной ткани сорняка с ростом частоты измерительного тока при электрическом повреждении зависит от значения дозы подведенной энергии. Это хорошо прослеживается при сравнении представленных зависимостей (рис. 4). В первом варианте электрической обработке подверглась растительная ткань корня осота полевого с удельной энергией одного импульса  $W_{1y0} = 0,65 \text{ Дж/см}^3$  при напряжении обработки  $U_0 = 6 \text{ кВ}$ , во втором –  $W_{2y0} = 1,21 \text{ Дж/см}^3$  при напряжении обработки  $U_0 = 8 \text{ кВ}$ . При воздействии с меньшим значением удельной энергии (рис. 4а) растительная ткань повреждается последовательно, достигая полной гибели только при воздействии 16 импульсов высокого напряжения при суммарной удельной энергии,

равной  $W_{\Sigma 1y0} = 5,16 \text{ Дж/см}^3$ . Полное повреждение ткани корня, характеризующееся исчезновением емкостных свойств в ней, подчеркивается тем, что кривая дисперсии трансформируется почти в прямую линию. Воздействие большей дозой электрической энергии единичного импульса, как во втором варианте, приводит к тому, что растительная ткань полностью повреждается за меньшее количество импульсов, в рассматриваемом варианте при 4 импульсах с суммарной удельной энергией, равной  $W_{\Sigma 2y0} = 4,86 \text{ Дж/см}^3$  (рис. 4б).

Параллельно были проведены исследования по изучению влияния электроимпульсных воздействий на наружные растительные ткани корневой системы корнеотпрысковых сорных растений и их же ткани внутренней структуры. При сравнении повреждения поверхностных (наружных тканей, или экзодерма) и внутренних тканей корневой системы осота розового был выявлен тот факт, что, несмотря на более высокое значение сопротивления ткани экзодерма, последние меньше противостоят

**Таблица.** Значения расчетных параметров схемы замещения растительной ткани стебля осота розового при обработке ее импульсами высокого напряжения

Число воздействующих импульсов	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$R_3$ , Ом	$C_m$ , пФ
0	1304,4	24666,7	93247,6	2969,2
1	1304,48	13636,4	37091,6	5160,1
5	1304,4	6250,0	13090,3	7960,4
10	1304,4	4444,4	8882,9	10271,0
20	1304,4	1818,2	3927,1	18995,3



**Рис. 5.** Характер изменения частотных зависимостей входного сопротивления ткани ( $Z_{вх}$ ,  $R_{вх}$ ,  $X_{вх}$ ) при электроимпульсном повреждении растительной ткани стебля осота розового и разным числе воздействующих импульсов, полученных аналитическим расчетом.

электрическому воздействию, чем внутренние ткани. Это выявлено по тому факту анализа частотных зависимостей, что при практически одинаковой воздействующей дозе удельной электрической энергии наблюдается большее уменьшение значений удельного активного сопротивления именно для поверхностных тканей. Поведение кривых удельного активного сопротивления внутренних тканей при электрической обработке хорошо согласуется с теорией устойчивости к различному повреждающему воздействию корнеотпрысковых сорных растений.

Следует отметить, что найденные повреждающие значения доз удельной энергии не являются оптимальными, так как в экспериментах ставилась задача изучения изменения электропроводных свойств путем анализа поведения кривых дисперсий при электрическом повреждении. Почти двукратное отличие этих доз у растений осота розового определяется тем, что сорняки находились на этапе физиологического развития, оцениваемом как период плодоношения, который характеризуется самым большим удельным сопротивлением растительных тканей стебля и корневой системы.

Все представленные результаты являлись экспериментально полученными и поэтому возникают вопросы: а) характер поведения теоретически рассчитанных зависимостей совпадает ли с поведением экспериментальных графиков; б) пояснения процесса повреждения растительной ткани сорняков подтверждаются ли теоретическими доказательствами, например, поведением частотных зависимостей сопротивления растительной ткани?

Для ответа на эти вопросы воспользуемся ранее полученными теоретическими зависимостями для определения параметров схемы замещения растительной ткани [18, 20], а также результатами экспериментальных лабораторных исследований по изучению повреждения внутренних структур стебля осота розового. Изменение параметров схемы замещения при электроимпульсном повреждении растительной ткани внутренних структур стебля осота розового представлены в таблице.

Воспользовавшись полученными данными (см. таблицу), рассчитаем, используя аналитические частотные зависимости полного сопротивления ткани стебля, значения его активной и реактивной составляющих (1) и их изменение в процессе электроимпульсного повреждения. Обработка осуществлялась электрическими импульсами напряжения с амплитудой  $U = 5$  кВ, разрядный контур генератора импульсного напряжения имел накопительную емкость

$C_k = 1000$  пФ и индуктивность  $L = 110$  мГн. Энергия одного воздействующего на растительную ткань стебля осота розового электрического импульса характеризовалась удельным значением  $W_{\text{лг}} = 34,3 \times 10^{-3}$  Дж/см<sup>3</sup>.

Полученные результаты, представленные на рис. 5, хорошо согласуются с приведенными рассуждениями об использовании частотных зависимостей сопротивления тканей в качестве основной характеристики для оценки их электропроводных свойств и для объяснения возможного характера изменения сопротивления растительных тканей в процессе электроимпульсного повреждения.

Характер изменения приведенных на рис. 5 теоретически рассчитанных частотных зависимостей изменения полного, активного и емкостного сопротивления в процессе обработки подтверждают высказанную гипотезу об электрическом повреждении клетки (ткани) растений. Анализ рассматриваемых электропроводных характеристик свидетельствует о наличии экстремума емкостной составляющей (см. выражение 4), что позволяет сделать вывод о диапазоне частот, на котором емкостное сопротивление максимально, а полное сопротивление и его активная составляющая находятся на явно спадающей (линейной) части кривой (в рассматриваемом случае  $f \approx 2-3$  кГц). Выделенный диапазон частоты измерительного тока может служить основой при выборе частоты, на которой следует определять электропроводные свойства растительных объектов. Измерения, сделанные на этой частоте, позволят максимально достоверно получить информацию о состоянии обрабатываемой растительной ткани.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

График изменений удельного активного электрического сопротивления растительной ткани надземной и подземной частей сорных растений в процессе их необратимого электроимпульсного повреждения в зависимости от частоты измерительного тока, построенный по результатам проведенных экспериментальных исследований, позволяет сделать следующие заключения:

– в процессе электроимпульсного повреждения растительной ткани сорняков частотные зависимости их сопротивления имеют одинаковый характер, но вместе с количеством поглощенной тканью энергии наблюдается уменьшение сопротивления на низких частотах, при этом чем больше энергия, заключенная в воздействующем импульсе, тем глубже

повреждение – более существенное уменьшение сопротивления;

– при максимальном необратимом электроимпульсном повреждении рассматриваемые частотные зависимости трансформируются в прямые линии, параллельные оси абсцисс;

– повреждение растительной ткани электрическими импульсами высокого напряжения носит одинаковый характер для корневой системы и надземной части сорных трав, для внутренних и наружных (покровных) тканей.

Полученные экспериментальные результаты полностью соответствуют теоретическим представлениям о характере изменения частотных зависимостей сопротивления при электрическом повреждении. Частотные зависимости удельного активного сопротивления можно использовать для оценки степени (глубины) повреждения растительной ткани сорняков при электроимпульсной прополке сорной и нежелательной растительности.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Kasakova, A.S., Yudaev, I.V., Fedorishchenko, M.G., et al., New approach to study stimulating effect of the pre-sowing barley seeds treatment in the electromagnetic field, *OnLine J. Biol. Sci.*, 2018, vol. 18, no. 2, p. 197.
- Vincent, C., Panneton, B., Fleurat-Lessard, F., *Physical control methods in plant protection*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001, 322 p.
- Bajgai, T.R., Hashinaga, F., Isobe, S., et al., Application of high electric field (HEF) on the shelf-life extension of emblic fruit (*Phyllanthus emblica* L.), *J. Food Eng.*, 2006, vol. 74, p. 308.
- Kayalvizhi, V., Pushpa, A.J.S., Sangeetha, G., et al., Effect of pulsed electric field (PEF) treatment on sugarcane juice, *J. Food Sci. Tech.*, 2016, vol. 53, no. 3, p. 1371.
- Milani, E.A., Alkhafaji, S., Silva, F.V.M., Pulsed Electric Field continuous pasteurization of different types of beers, *Food Control*, 2015, vol. 50, p. 223.
- Baev, V.I., Baev, I.V., Petrukhin, V.A., et al., Electrotechnology as one of the most advanced branches in the agricultural production development, In book *Handbook of research on renewable energy and electric resources for sustainable rural development*, Hershey, Pennsylvania: IGI Global, 2018, p. 149–175.
- Stankovic, M.V., Cvijanovic, M., Dukic, V., Ecological importance of electrical devices innovative in the process of anti *Ambrosia artemisiifolia* L., *Econ. Agric.*, 2016, no. 3, p. 861.
- Agcama, E., Akyildiz, A., Akdemir Evrendilek, G., Comparison of phenolic compounds of orange juice processed by pulsed electric fields (PEF) and conventional thermal pasteurization, *Food Chem.*, 2014, vol. 143, p. 354.
- Barba, F.J., Parniakov, O., Pereira, S.A., et al., Current applications and new opportunities for the use of pulsed electric fields in food science and industry, *Food Eng. Rev.*, 2015, vol. 77, p. 773.
- Vorobiev, E., Lebovka, N., Pulsed-electric fields induced effects in plant tissues: Fundamental aspects and perspectives of applications, In book *Electrotechnologies for extraction from food plants and biomaterials*, NY: Springer, 2009, p. 39–81.
- Jeyamkondan, S., Jayas, D.S., Holley, R.A., Pulsed electric field processing of foods: a review, *J. Food Protect.*, 1999, vol. 62, no. 9, p. 1088.
- Cole, K.S., Cole, R.H., Dispersion and absorption in dielectrics. I. Alternating current characteristics, *J. Chem. Phys.*, 1941, vol. 9, p. 341.
- Мелещенко, С.Н., К вопросу о природе изменений электрических свойств растительной ткани при изменении внешних условий, *Биофизика*, 1965, т. 10, № 3, с. 78.
- Zhang, M.I.N., Willison, J.H.M., Electrical impedance analysis in plant tissues, *J. Exp. Bot.*, 1993, vol. 44, no. 8, p. 1369.
- Bera, T.K., Jampana, N., Lubineau, G., A LabVIEW-based electrical bioimpedance spectroscopic data interpreter (LEBISDI) for biological tissue impedance analysis and equivalent circuit modelling, *J. Electr. Bioimpedance*, 2016, vol. 7, p. 35.
- Randviir, E.P., Banks, C.E., Electrochemical impedance spectroscopy: an overview of bioanalytical applications, *Anal. Methods*, 2013, vol. 5, p. 1098.
- Кривцун, И.В., Пентегов, И.В., Сидорец, В.Н., и др., Методика обработки экспериментальных данных при моделировании дисперсии импеданса биологических тканей с помощью схемы замещения Фрике, *Электротехника і Електро-механіка*, 2017, № 5, с. 27.
- Юдаев, И.В., Баев, В.И., Бренина, Т.П., Елисеев, Д.С., *Сорные растения как объект электрической прополки: биологические особенности и электрофизические свойства*, Волгоград: Станица-2, 2004, 128 с.
- Баев, В.И., Бородин, И.Ф., *Электроимпульсная предуборочная обработка растений подсолнечника и табака*, Волгоград: Станица-2, 2002, 230 с.
- Юдаев, И.В., Анализ изменения параметров схемы замещения растительной ткани сорного растения при электроимпульсном воздействии, *ЭОМ*, 2018, т. 54, № 2, с. 82.

#### Summary

Currently, in order to obtain pre-planned results and increase the efficiency of using existing technologies, electrotechnological operations are applied in the processes of agricultural production, food and processing industries, including those that implement the effects of high voltage impulses. One of such promising technologies in agriculture can be considered to be

electric impulse weeding that is the fight against unwanted and weed vegetation. Such operation, which is carried out with high rates of technological efficiency, is environmentally friendly and refers to high-tech processes. For practical applications and technical implementations, it is necessary to study various properties and parameters of effected objects – weeds. The partial dependence of the electrical resistance of the plant tissue or the dispersion of resistance over the frequency of the measuring current was decided to be used as the studied characteristic. This approach allows to consider weeds not only as a load with which the electrical energy supply system is in contact but also to thoroughly study how this resistance changes during processing. The conducted experimental studies made it possible to clarify the nature of the change in resistance under the damage process to plant tissue, as well as to estimate the quantitative indicators of both the energy absorbed by the plant tissue and the ranges of variations of its resistance. The change

character in the plant tissue resistance at the process of the electrical impulse damage remains unchanged, only the resistance value at low frequencies decreases. The total damage corresponds to the period of processing when the resistance of the plant tissue is practically equal at low and high frequencies. This behavior of the mentioned parameter is typical for internal and surface tissues of weeds, as well as for their root systems and leaf-stem parts. Theoretical verification of the change character in the plant tissue resistance of destroyed weeds confirmed the description of the proposed mechanism of change in resistance in the process of irreversible electrical impulse damage.

*Keywords:* electrical impulse weeding, electrical circuit for replacing plant tissue of weeds, dispersion of the impedance of plant tissue in frequency, electrical impulse damage to plant tissue, change in the electrical conductive properties of plant tissue