

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Побединский А.В. Совершенствование постепенных и выборочных рубок. - М.: Лесн. хоз-во. - № 3. - 1982. - 17 с.
2. Schoenenberger W., Kasper H., Laessig R. Forschungsprojekte zur Wiederbewaldung von Sturmschadenflaechen // Schweiz/ Z. Forstwes., 1992 (143), 10. S. 829-847.
3. Чиндяев А.С. Лесоводственные особенности постепенных рубок в горных ельниках Урала / Дис. на соиск. учен. степени канд. с.-х. наук.- Свердловск: УЛТИ, 1971. - 280 с.
4. Инструкция по сохранению подроста и молодняка хозяйственно – ценных пород при разработке лесосек и приемке от лесозаготовителей вырубок с проведением мероприятий по восстановлению леса. – М.: Госкомлес СССР, 1984. – 16 с.
5. Тихонов А.С. Лесоводственные основы различных способов рубки леса для возобновления ели. – Л., 1979. – 285 с.

УДК 630.425 + 630.181.21

С.А. Шавнин, И.Д. Яковлев, Д.Ю. Голиков, Е.С. Папулов
(Уральский государственный лесотехнический университет)
В.Г. Иванченко
(Комитет природных ресурсов по Таймырскому АО)

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ТКАНЕЙ ПРИКАМБИАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА
СТВОЛА ПРИ ДИАГНОСТИКЕ СОСТОЯНИЯ ДЕРЕВЬЕВ СОСНЫ
ОБЫКНОВЕННОЙ**

Приведена принципиальная схема портативного прибора ИД-5, предназначенного для измерения электрического импеданса биологических тканей (активной и реактивной составляющих). Испытания прибора показали, что электрическое сопротивление флоэмы существенно меньше, чем ксилемы. Разработана методика диагностики состояния дерева с помощью определения удельного сопротивления и электрической емкости ткани.

Одной из важных проблем, возникающих при комплексной оценке состояния древостоев с применением физиологических методов, является дефицит методов и оборудования, которые могут быть использованы не-

посредственно в полевых условиях без повреждения древесных растений. К числу апробированных и перспективных подходов к диагностике деревьев относится измерение электрического импеданса тканей прикамбиального комплекса ствола [1, 2, 3, 4, 5]. В ряде работ показана возможность применения данной характеристики при определении степени поражения древостоев сосны аэропромышленными загрязнениями [6, 7, 8, 9]. У угнетенных деревьев величина активной составляющей электросопротивления ствола возрастает по сравнению с контрольными. Данный факт объясняется нарушением интенсивности водно-минерального транспорта по ксилеме и ухудшением физиологического состояния камбиальных клеток.

Следует отметить, что вплоть до настоящего времени отсутствовали данные о реактивной составляющей электрического импеданса тканей ствола. Это существенно затрудняло интерпретацию результатов и снижало возможности применения методики в экофизиологических исследованиях. Целью настоящей работы являлась разработка портативного прибора для измерения электрического импеданса растительных тканей (включая его активную и емкостную составляющие) на примере прикамбиального комплекса ствола и определение перспективности его использования при оценке состояния древостоев сосны обыкновенной, подверженных влиянию аэропромышленных загрязнений.

Принцип измерений импеданса и описание работы импедансметра

При измерении параметров комплексного сопротивления (импеданса) возникают определенные трудности, суть которых в том, что не удается измерить активную и реактивную составляющие последовательно во времени. Данная задача может быть решена путем фазоквадратурного разделения выходных сигналов. Однако такие устройства предъявляют очень жесткие требования к стабильности частоты и амплитуды генератора и, особенно, к точности сдвига фазы фазовращателем. Эти требования значительно усложняют схемное решение такого измерителя. Как правило, это сложное и дорогостоящее оборудование.

Рассмотрим частный случай измерения комплексного сопротивления двухполюсника, состоящего из параллельно включенных резистора R и конденсатора C (электрического эквивалента растительной ткани), включенных последовательно в цепь генератора гармонического сигнала и измерительной схемы (рис. 1).

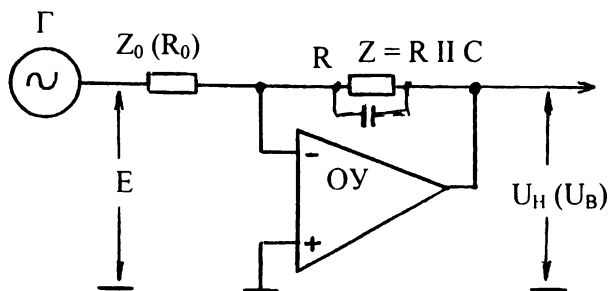


Рис. 1. Принципиальная схема измерения электрического импеданса

Генератор Γ вырабатывает синусоидальное напряжение амплитудой E низкой или высокой частоты (F_n или F_v). Напряжение низкой (U_n) или высокой (U_v) частоты поступает на измерительную схему, состоящую из эталонного резистора R_0 , измеряемого комплексного сопротивления Z и операционного усилителя ОУ.

В общем виде сопротивление можно представить как:

$$Z = R - jX,$$

$$Z = \frac{R}{\sqrt{1 + (6,28 F C R)^2}},$$

где Z – комплексное сопротивление;

R – активная составляющая КС;

$(6,28 F C)$ – реактивная составляющая КС.

Перед выводом формулы для определения составляющих комплексного сопротивления введем следующие допущения.

1. Эталонное сопротивление содержит только активную составляющую ($Z_0 = R_0$).

2. Частота F_v значительно выше частоты F_{II} .

Рассмотрим вначале работу схемы при низкой частоте генерации F_{II} . Известно, что реактивная составляющая, носящая емкостной характер (конденсатор), подключенная параллельно активной составляющей (резистору), может оказывать шунтирующее воздействие тем значительнее, чем выше частота. Строго говоря, частоту F_{II} можно выбрать сколь угодно низкой и тогда шунтирующее воздействие конденсатора будет пренебрежимо мало, т.е. $jX = 0$. В этом случае напряжение на выходе измерительной схемы можно представить в виде:

$$U_n = E \frac{R_n}{R_0}, \quad (1)$$

где U_n – напряжение на выходе ОУ при F_{II} ;

R_n – измеряемое сопротивление;

R_0 – эталонное сопротивление;

E – напряжение источника переменного тока.

Для нахождения активной составляющей на низкой частоте используем уравнение:

$$R_n = U_n \frac{R_0}{E}. \quad (2)$$

Таким образом, зная напряжение E и величину R_0 и измерив напряжение U_n , можно расчетным путем найти R_n . Заметим при этом, что входящие в формулы (1) и (2) E и R_0 величины постоянные, поэтому формулу (2) можно записать в виде:

$$R_n = U_n K, \quad (3)$$

где $K = \frac{R_0}{E}$.

Из полученного выражения следует, что величина измеряемого импеданса пропорциональна выходному напряжению измерительной схемы U_n . Следовательно, если измерить напряжение на выходе ОУ вольтметром, то получим напряжение, соответствующее сопротивлению R_n , а если омметром – величину сопротивления.

Если изменить частоту генерации на высокую F_B , то в этом случае реактивная составляющая импеданса должна оказывать шунтирующее

$$U_B = E \frac{Z_B}{R_0}, \quad (4)$$

воздействие и тем значительнее, чем существеннее разница частот.

где U_B – напряжение на выходе ОУ на высокой частоте;

Z_B – измеряемый импеданс на высокой частоте.

Для случая параллельного соединения сопротивления и конденсатора комплексное сопротивление Z имеет вид:

$$Z_B = \frac{R_H}{\sqrt{1 - (6,28 F_H C R_H)^2}}. \quad (5)$$

Подставив выражение (5) в (4) и преобразуя его с учетом выражения (2), получим равенство:

$$U_B \sqrt{1 + (6,28 F_B C R_H)^2} = U_H. \quad (6)$$

Умножим левую и правую части уравнения (6) на K и, с учетом (3), получим:

$$Z_B \sqrt{1 + (6,28 F_B C R_H)^2} = R_H. \quad (7)$$

Распишем полученное равенство для неизвестного C :

$$C = \frac{1}{6,28 F_B} \sqrt{\frac{1}{Z_B^2} - \frac{1}{R_H^2}}. \quad (8)$$

Из полученного выражения расчетным путем нетрудно найти величину емкости. Далее, зная R_H и C , можно найти R по формуле (5), переписав ее для неизвестного R , а в качестве известных взять F_H , R_H и найденную в (8) C :

$$R = \frac{R_H}{\sqrt{1 - (6,28 F_H C R_H)^2}}. \quad (9)$$

Таким образом, используя метод двух разнесенных частот в сочетании с расчетным методом, можно решить задачу измерения составляющих комплексного сопротивления двухполюсника последовательно по времени с достаточной точностью и без применения сложного электронного оборудования.

Для реализации описанного выше принципа был разработан и создан импедансметр ИД-5, имеющий приведенные ниже технические характеристики.

Диапазон измерения:

сопротивления, кОм,от 1 до 199,9

емкости, пФ,от 5 до 600

Рабочая частота измерения:

сопротивления, кГц,1

емкости, кГц,50 или 100

Максимальная погрешность измерения:

сопротивления, %,не более 5

емкости, %,не более 10

Диапазон рабочих температур, °С,от +5 до +40

Напряжение питания, В,от 9 до 12

Потребляемый ток, мА,не более 40

Источник питанияаккумулятор

Масса, кг,не более 0,4

Габаритные размеры, мм,130×90×40

Принцип действия прибора при измерении активной составляющей импеданса основан на сравнении измеряемого сопротивления с эталонным на низкой частоте, на которой емкостная составляющая не оказывает существенного влияния. Емкостная составляющая определяется расчетным путем, при этом в качестве исходных данных используются результаты измерения прибором импеданса на двух частотах – низкой (1 кГц) и высокой (50 или 100 кГц).

Структурная схема прибора представлена на рис. 1. В ее состав входят: генератор фиксированных частот, измеритель импеданса, преобразователь переменного напряжения в постоянное, вольтметр, узел индикации, узел коммутации, устройство контроля разрядки аккумулятора.

Объекты и методика

Измерения электрического импеданса прикамбиального комплекса ствола проводили на двух пробных площадях (ПП), расположенных на различном удалении от Среднеуральского медеплавильного завода (г. Ревда), являющегося основным источником аэропромышленных загрязнений в данном районе. Основная доля выбросов приходится на SO_2 и соединения тяжелых металлов.

Пробная площадь № 4 (контрольная) расположена в верхней части склона западной экспозиции на удалении 18,8 км от источника выбросов в юго-западном направлении (район станции Ильмовка). Состояние древостоев – хорошее [10]. Площадь представлена культурами сосны второго класса возраста на площади 0,129 га. Таксационные характеристики ПП: тип леса ельник травяно-липняковый; бонитет II; состав яруса 10 С; средняя высота 9,5 м; средний диаметр 12,4 см; относительная полнота 1,11; густота 2,45 тыс. шт./га; запас 150 м³/га. Средний радиальный прирост за 5 лет составляет 10,51 мм, а за 10 лет – 25,89 мм.

Пробная площадь № 9 расположена в средней части крутого склона северо-западной экспозиции на удалении 4,1 км от источника выбросов в северо-восточном направлении (г. Первоуральск, район пос. Магнитка). По совокупности морфометрических параметров древостоя их состояние оценивается как очень плохое [10]. Площадь представлена культурами сосны второго класса возраста на площади 0,082 га. Таксационные характеристики ПП: тип леса сосняк ягодниковый; бонитет V; состав яруса 10 С; средняя высота 7 м; средний диаметр 6,5 см; относительная полнота 0,87; густота 4,903 тыс. шт./га; запас 87 м³/га. Средний радиальный прирост за 5 лет составляет 3,11 мм, а за 10 лет – 7,19 мм.

Физиологическое состояние системы водно-минерального транспорта ствола определяли с помощью измерения активной и реактивной составляющих электрического импеданса прикамбиального комплекса. Измерение производили с помощью портативного импедансметра ИД-5, разработанного на кафедре биофизики УГЛТУ. Методика измерений подробно описана ранее [7, 8, 9]. Необходимые для определения активной и реактивной составляющей электрического импеданса тканей ствола расчетные формулы приведены выше.

В качестве объектов исследований на каждой ПП использовали по три модальных по высоте и диаметру дерева сосны обыкновенной. Изме-

рения электрофизиологических характеристик проводились в трех биологических повторностях на двух высотах – 0,8 и 1,3 м.

Результаты измерений электрического импеданса прикамбиального комплекса ствола деревьев сосны на ПП № 4 и № 9 приведены в табл. 1.

Поскольку при проведении измерений глубина введения электродов постоянна (15 мм), у нормальных и пораженных деревьев иглы электродов прокалывают разное количество годичных колец. Анатомические особенности строения древесины и физиологические отличия между клетками отдельных слоев позволяют считать, что электросопротивление ранней древесины существенно ниже, чем поздней. Таким образом, электрический эквивалент ткани между электродами представляет собой цепь, состоящую из параллельно соединенных сопротивлений и конденсаторов. Каждый слой в этой цепи представлен активным сопротивлением и параллельно включенным конденсатором. Из этого следует, что измеренные значения активной и реактивной (емкостной) составляющих импеданса ткани являются суммарными для соответствующих параллельно соединенных элементов цепи. Зная количество слоев, равное числу годичных колец вокруг электродов, можно рассчитать средние величины активного и реактивного сопротивления одного годичного слоя, а также значение емкости, соответствующей реактивной составляющей импеданса.

Таблица 1

Сезонные изменения активной составляющей импеданса (R) и емкости прикамбиального слоя деревьев сосны на ПП 4 и 9

№ ПП	Дата	R, кОм	C, пФ
4	27.05.02	15,32±1,47	378,0±72,65
	21.07.02	17,71±3,73	336,0±59,44
	04.09.02	22,28±3,81	250,0±31,25
	29.09.02	28,44±4,31	193,0±29,12
9	27.05.02	13,93±3,09	345,0±71,21
	21.07.02	14,17±2,28	339,0±45,61
	04.09.02	18,22±3,49	260,0±21,49
	29.09.02	22,38±2,32	223,0±34,45

При использовании методики электрофизиологической оценки состояния системы водно-минерального транспорта в районах со средним и слабым уровнем загрязнения отличия в радиальных приростах между фо-

слабым уровнем загрязнения отличия в радиальных приростах между фоновыми и угнетенными древостоями не столь существенны, как в районах с интенсивным аэротехногенным воздействием. Из вышесказанного следует, что для корректного сравнения сильно различающихся по радиальным приростам древостоев необходимо пронормировать как активную, так и реактивную составляющие электросопротивления к толщине годичного слоя. Кроме того, электрофизиологические характеристики флоэмы и ксилемы следует рассматривать отдельно.

Для этого в конце октября был проведен эксперимент по измерению электрического импеданса отдельных слоев. Изучали как суммарное сопротивление ксилемы и флоэмы, так и каждой ткани отдельно. Определяли сопротивление ксилемы у трех деревьев с трех сторон, всего 9 измерений. С каждой стороны были взяты керны для определения радиального прироста. Среднее количество годичных колец составляло в контроле 7, а на худшей ПП – около 18 (при глубине погружения электродов 15 мм). В результате обработки данных с применением формул расчета сопротивлений и емкостной составляющей ксилемы и флоэмы были получены приведенные ниже величины.

Суммарное сопротивление ксилемы и флоэмы ($R_{\Sigma(k+\phi)}$) составляет 35,3 кОм, а суммарное сопротивление ксилемы ($R_{\Sigma k}$) – 94,8 кОм.

Из приведенного выше описания эквивалентной схемы тканей следует, что сопротивление флоэмы (R_{ϕ}) определяется по формуле:

$$R_{\phi} = \frac{R_{\Sigma(k+\phi)} R_{\Sigma k}}{R_{\Sigma k} - R_{\Sigma(k+\phi)}}. \quad (12)$$

Оно составляет 56,24 кОм. При этом сопротивление одного слоя ксилемы ($R_{ik} = R_{\Sigma k} / n$, где n – число слоев ксилемы) равно 663,6 кОм.

Приведенные расчеты и учет размеров электродов позволяют определить удельное сопротивление ксилемы $\rho_{\Sigma k}$ и флоэмы ρ_{ϕ} по формулам:

$$\rho_{\Sigma k} = \frac{R_{ik} \pi r d_{ik}}{L}; \quad (13)$$

$$\rho_{\phi} = \frac{R_{\phi} \pi r d_{\phi}}{L}, \quad (14)$$

где r – радиус электродов (0,5 мм);

- d_{ik} – толщина одного слоя ксилемы;
- d_{ϕ} – толщина флоэмы (2 мм);
- L – расстояние между электродами (1 мм).

Расчет показывает, что $\rho_{\Sigma k} = 0,193$ кОм·м, а $\rho_{\phi} = 0,018$ кОм·м. Измеренная величина емкости ксилемы и флоэмы ($C_{\Sigma(k+\phi)}$) составляла 162,7 пФ, а ксилемы (C_k) - 64,2 пФ. Тогда емкость ткани флоэмы (C_{ϕ}) составляет 98,5 пФ. Приведенные выше результаты дают возможность определить соотношения $R_{\Sigma(k+\phi)} : R_{\phi}$ и $C_{\Sigma k} : C_{\phi}$, которые составляют 1,69 и 0,65 соответственно.

Соотношения сопротивлений и емкостей могут быть использованы для расчета отдельных характеристик на основании сделанных ранее измерений (табл. 1). Пример результатов такой обработки приведен в табл. 2. Прямые измерения импеданса ствола показали, что в мае 2003 г. величины этой характеристики составляли 17,7 и 19,4 кОм на ПП 4 и 9 соответственно, а в июне – 15,8 и 17,6 кОм.

Анализ данных показал, что электросопротивления ксилемы выше, чем у флоэмы, а емкость – ниже. На 4 ПП (контроль) сопротивление тканей ствола больше в течение всего периода вегетации. При этом емкость одного слоя ксилемы на 4 ПП выше, чем на 9 ПП.

Следует отметить, что величины удельных сопротивлений более чувствительны и информативны для целей диагностики, так как отношение удельного сопротивления флоэмы к удельному сопротивлению ксилемы превышает соответствующее отношение измеренных электросопротивлений в 6,5 раза. Это связано с зависимостью удельного сопротивления ткани от толщины флоэмы и количества слоев ксилемы, а также от выбранного метода измерения.

Таблица 2

Электрофизиологические характеристики тканей флоэмы и ксилемы деревьев сосны на ПП 4

№ ПП	Дата	R_{ϕ} , кОм	$R_{\Sigma k}$, кОм	ρ_{ϕ} , кОм·м	$\rho_{\Sigma k}$, кОм·м	C_{ϕ} , пФ	$C_{\Sigma k}$, пФ	C_{ik} , пФ
4	18.05.03	32,57	38,80	0,0092	0,0804	222,51	85,81	14,30
	22.06.03	34,40	29,93	0,0097	0,0691	238,47	108,70	15,53
9	18.05.03	31,19	51,33	0,0066	0,1100	139,14	67,35	3,74
	22.06.03	36,91	33,77	0,0078	0,0796	126,37	78,28	3,73

Более детальный анализ причин отличий отдельных характеристик на ПП 4 и 9 требует дополнительных исследований.

Таким образом, результаты испытаний разработанного портативного прибора для измерения электрического импеданса тканей ствола подтверждают возможность применения данного подхода в диагностике состояния как отдельных деревьев, так и древостоев сосны. Использование соотношений электросопротивлений и емкостей тканей флоэмы и ксилемы является перспективным методическим приемом при определении электрофизиологических характеристик.

Данная работа выполнялась при поддержке Министерства образования РФ грант № 05.01.022 и РФФИ грант № 01-04-96428.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голодрига П.Я., Осипов А.В. Экспресс-метод и приборы для диагностики морозоустойчивости растений // Физиология и биохимия культурных растений. –1972. -Т 4. - Вып. 6. – С. 650-655.
2. Каширо Ю.П. Методы и аппаратура для изучения внешней среды древесных растений на их начальных этапах онтогенеза // Тр. ин-та экологии растений и животных УНЦ АН СССР. - Свердловск, 1976. - Вып. 100. - С. 56-98.
3. Каширо Ю.П., Хасанов Н.Х., Дорожкин Е.М. Электрическое сопротивление тканей прикамбиального комплекса ствола у сосны обыкновенной и его диагностические возможности // Леса Урала и хозяйство в них. –Свердловск, 1988. – Вып.14. –С. 183-188.
4. Zhang M. I. N. and Willison J. H. M. Electrical impedance analysis in plant tissues: in vivo detection of freezing injury / Can. J. Bot. - 1992. - Vol. 70.- Pp. 2254-2258.
5. Шавнин С.А., Свешников В.А., Кирпичникова Т.В. Комплексная сравнительная оценка состояния сосновых и еловых молодняков в зоне атмосферных загрязнений Ревдинско-Первоуральского промышленного узла // Дефектоскопия. – 1993. - № 9. – С. 79-84.
6. Калинин В.А. и др. Модель оценки состояния пораженных древостоев // Экология. – 1991. - №3. - С. 21-28.
7. Голиков Д.Ю. Влияние фитотоксичности почв на состояние сосновых молодняков (в условиях Уральской горно-лесной области)/ Автореф...дис. канд. с.-х. наук. - Екатеринбург, 2000. – 18 с.
8. Голиков Д.Ю., Шавнин С.А., Овчинников И.С. Оценка состояния

сосновых древостоев с помощью измерения электрического импеданса ствола. // Леса Урала и хозяйство в них.- Екатеринбург, 2001.– С. 264 – 272.

9. Шавнин С.А. Голиков Д.Ю., Калинин В.А. и др. Экологический подход к оценке состояния сосновых древостоев, расположенных в зонах антропогенного воздействия. // Технологии качества жизни. - Екатеринбург, 2000. - Вып. 2000. - С. 57 – 68.

10. Фомин В.В. Морфологическая оценка состояния сосновых молодняков в зоне действия атмосферных загрязнений Первоуральско - Ревдинского промышленного узла: Автореф. ... дис. канд. с.- х. наук. - Екатеринбург, 1998. - 23 с.

УДК 676.273:628.517.2

Н.Н. Черемных, Т.В. Загребина

(Уральский государственный лесотехнический университет)

ЭКОЛОГИЧЕСКИ ОРИЕНТИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С УЧЕТОМ ШУМОВОГО ФАКТОРА В ЛЕСНОМ КОМПЛЕКСЕ

Экологически ориентированное проектирование технологического оборудования с учетом шумового фактора в лесном комплексе - необходимое условие качества продукции.

Переход к рыночной экономике вместе с повышающейся индустриализацией в лесном комплексе расширяет и углубляет экологический кризис.

Экологически ориентированное проектирование технологического оборудования с учетом шумового загрязнения рабочих зон и селитебных территорий является в настоящее время одним из направлений в отрасли.

Технологическая среда для реализации своей целевой функции потребляет энергию, в нашей отрасли в основном электрическую, преобразуя ее в механическую посредством кинематических схем. При этом всегда имеют место потери, которые формируют различные виды отходов: энергетические, твердые, жидкие и газообразные. Среди энергетических потерь (тепловые, шумовые, вибрационные, электромагнитные) за последние десятилетия шумовые потери (акустическое загрязнение) привлекали внима-