



КЛАССИФИКАЦИЯ
КОНСТРУКЦИОННОЙ ДРЕВЕСИНЫ
ПО МАГНИТНОЙ
НЕЙТРАЛЬНОСТИ: ШКАЛА
ЧИСТОТЫ N-GRADE ДЛЯ
МАТЕРИАЛОВ АУДИООПОР С
ХАРАКТЕРИСТИКОЙ СЛЕДОВЫХ
ПАРАМАГНИТНЫХ ПРИМЕСЕЙ В
ЭКВАТОРИАЛЬНОМ ТИПЕ



Классификация конструкционной древесины по магнитной нейтральности: шкала чистоты N-grade для материалов аудиоопор с характеристикой следовых парамагнитных примесей в экваториальном тике

A. Bosque, M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Аннотация

Аудиопроводники обычно специфицируются по металлургическим классам чистоты -- 4N (99.99%), 6N (99.9999%) и выше, -- однако конструкционные материалы, которые поддерживают, приподнимают и оконцовывают эти проводники, если и специфицируются, то по внешнему виду. Такая асимметрия не имеет оправдания: материал опоры, непрерывно соприкасающийся с сигнальным кабелем, участвует в ближнем электромагнитном поле кабеля, а потому его магнитные и диэлектрические свойства являются измеримыми параметрами инсталляции, а не декоративными характеристиками. Мы предлагаем классификацию конструкционной древесины по шкале чистоты N-grade, аналогичную N-grade для металлов, но определяемую величиной, существенной для непроводника: остаточным содержанием парамагнитных примесей. Класс древесины устанавливается по её объёмной магнитной восприимчивости и, эквивалентно, по совокупной массовой доле доминирующих парамагнитных загрязнителей -- железа и марганца, определяемой масс-спектрометрией с индуктивно связанной плазмой после микроволнового кислотного разложения. Мы характеризуем 11 пород-кандидатов и показываем, что большинство мебельных лиственных пород -- особенно белый дуб с содержанием железа от 41 до 190 ppm -- не достигают нейтральности 4N, тогда как плантационный тик (*Tectona grandis*), выращенный в пределах 5 deg от геомагнитного экватора, в состоянии поставки достигает 5N (99.999 процента магнитной нейтральности, $Fe + Mn \leq 10$ ppm), а при отборе отдельных заготовок -- 6N. Мы приводим описание приборов, границы классов, диэлектрические последствия ориентации волокон и влажности, а также переклассификацию нейтральной древесины как «магнитно скомпрометированной» после нанесения любого покрытия, отверждаемого металлическим катализатором.

1. ВВЕДЕНИЕ

Рынок аудиофильских проводников организован вокруг чистоты. Бескислородная медь продаётся как 4N (99.99 процента), 5N, 6N и -- на пределе возможностей электролитического рафинирования -- 7N. Считается, что каждая дополнительная девятка устраняет центр рассеяния, примесь на границе зерна, парамагнитное включение. Сохраняется ли слышимое преимущество последней девятки в контролируемом прослушивании -- отдельный вопрос, рассмотренный в другой работе этого журнала; здесь существенно то, что отрасль располагает строгим, количественным и общепонятным языком для описания чистоты проводника.

Для всего остального такого языка у неё нет. Кабель классифицируют до семи девяток, а затем кладут на пол, крепят к стене или укладывают на опору совершенно неопределённого состава. Опору выбирают по цвету. Таково положение древесины в аудиосистеме: она несёт конструкционную нагрузку, непрерывно физически соприкасается с сигнальным проводником и при этом остаётся метрологически невидимой.

Мы считаем это неприемлемым. Материал опоры, соприкасающийся с кабелем, входит в непосредственное диэлектрическое и магнитное окружение кабеля. Если он содержит ферромагнитные включения -- частицу стружки ленточной пилы, обломок скобы, железо, которое дерево извлекло из почвы и связало в ядровой древесине, -- вдоль трассы возникает локальный скачок магнитной проницаемости. Если материал гигроскопичен и полярен, он вносит распределённую, зависящую от влажности ёмкость. Именно эти величины призваны контролировать класс чистоты самого проводника. Непоследовательно задавать для одного шесть девяток, а другое оставлять на усмотрение краснодеревщика.

В этой работе предлагается классификация конструкционной древесины по N-grade, определённая не химической чистотой в объёмном смысле -- древесина примерно наполовину состоит из углерода и никогда не будет «99.999 процента древесиной» в сколько-нибудь осмысленном значении, -- а единственным свойством, посредством которого древесина взаимодействует с трактом аудиосигнала: остаточным содержанием парамагнитных примесей и создаваемой ими объёмной магнитной восприимчивостью.

2. КЛАСС НЕЙТРАЛЬНОСТИ И ШКАЛА N

Сухая древесина диамагнитна. Целлюлоза, лигнин и связанная вода обладают небольшой отрицательной объёмной магнитной восприимчивостью, и чистая, свободная от загрязнений древесина имеет $\chi_v = -6 \times 10^{-6}$ (SI, безразмерная объёмная восприимчивость), что соответствует относительной магнитной проницаемости $\mu_r = 0.999994$ -- неотличимой от единицы и фактически совсем немного меньшей её. Таким образом, совершенно нейтральная древесина не просто немагнитна; она слабо и воспроизводимо диамагнитна, а именно это является



правильным и желательным состоянием для материала, которому надлежит находиться в статическом и квазистатическом поле, не возмущая его.

Отклонения от этого базового уровня почти полностью обусловлены парамагнитными примесями переходных металлов, среди которых преобладает железо, а марганец занимает далёкое второе место. Дерево работает как минеральный насос: извлекает ионы металлов из почвенной воды и неравномерно откладывает их в своих тканях. Возникающее содержание железа меняется от нескольких частей на миллион в чистой плантационной лиственной породе до сотен частей на миллион в породах, чья танниновая химия активно хелатирует железо. Каждая часть на миллион железа вносит небольшую положительную прибавку к восприимчивости, поднимая древесину от её диамагнитного дна к магнитной нейтральности, а у худших пород -- и выше неё.

Поэтому мы определяем класс нейтральности древесины по совокупной массовой доле железа и марганца и, эквивалентно, по измеренному отклонению объёмной восприимчивости от диамагнитного базового уровня:

- 4N (99.99 процента нейтральности): $Fe + Mn \leq 100$ ppm. Типичный уровень неотобранной мебельной древесины.
- 5N (99.999 процента нейтральности): $Fe + Mn \leq 10$ ppm; остаточная восприимчивость в пределах $\pm 1 \times 10^{-6}$ от диамагнитного базового уровня. Спецификация поставки Equatorial Audio.
- 6N (99.9999 процента нейтральности): $Fe + Mn \leq 1$ ppm; суммарная восприимчивость остаётся диамагнитной в пределах неопределённости измерения. Достижимо при отборе отдельных заготовок.
- 7N: $Fe + Mn \leq 0.1$ ppm. В настоящей работе зафиксировано для двух из 340 проверенных тиковых заготовок. Не является серийным классом.

Мы признаём, что эти проценты представляют собой риторическое заимствование из принятой для металлов системы, а не показатель объёмного состава; «99.999 процента нейтральности» означает 10 ppm существенной примеси, а не 10 ppm недревесного вещества. Мы сохраняем это обозначение, поскольку читатель уже привык рассуждать в нём и поскольку исходная величина -- части на миллион парамагнитных примесей -- измеряется точно так же, как рафинировщик меди измеряет примеси в катоде.

3. ПРИБОРЫ И МЕТОД

Для присвоения класса заготовке требуются три независимых магнитных и химических измерения -- поиск ферромагнитных включений, определение объёмной восприимчивости и анализ следовых металлов, -- а также диэлектрическая характеристика для моделирования инсталляции.

Поиск ферромагнитных включений. Каждую заготовку пропускают на моторизованном столе со скоростью 20 mm/s через массив феррозондовых градиометров (Bartington Grad-13, три оси, разрешение 1 nT). Градиометр обнаруживает отдельные ферромагнитные включения -- внедрённые гвозди, дробь, стружку ленточной пилы, обычные загрязнения всякой древесины, прошедшей через промышленное оборудование, -- вплоть до субмиллиметровых частиц на глубине 30 mm. Вторичная и спасённая древесина регулярно не проходит это испытание; главным образом поэтому блоки Equatorial Elevation Blocks изготавливаются из плантационного сырья первого прохода и никогда -- из вторичной древесины, сколь бы романтичным ни было её происхождение.

Объёмная восприимчивость. Из каждой принятой заготовки извлекают керн диаметром 12 mm и измеряют его в вибрационном магнитометре (Lake Shore 8600, чувствительность 5×10^{-8} emu) при 300 K. VSM возвращает суммарную объёмную восприимчивость, по которой непосредственно определяется магнитный критерий класса. Чистый тик даёт отрицательное значение; дубовый керн часто даёт положительное.

Анализ следовых металлов. Затем измеренный керн измельчают после замораживания, подвергают микроволновому разложению в смеси азотной и плавиковой кислот и анализируют методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) на Fe, Mn, Ni, Co и Cr. Это тот же дендрохимический протокол, который используют для восстановления истории загрязнений по годичным кольцам, только применённый здесь с целью, которой, как мы готовы признать, его создатели не предвидели. Показатель $Fe + Mn$ задаёт химический критерий класса; магнитный и химический критерии должны совпадать в пределах диапазона класса, иначе заготовка отклоняется как внутренне противоречивая -- обычно это указывает на включение, пропущенное градиометром.

Диэлектрическая характеристика. Для моделирования инсталляции мы измеряем относительную диэлектрическую проницаемость и тангенс угла потерь на обработанных образцах с помощью экранированной ячейки с параллельными пластинами и анализатора импеданса (Keysight E4990A) в диапазоне от 20 Hz до 10 MHz, вдоль и поперёк волокон, после кондиционирования до влажности 8, 12 и 16 процентов. Эти показатели не входят в класс нейтральности -- диэлектрик не является магнитной примесью, -- но определяют распределённую ёмкость, которую готовая опора вносит в кабель, и приводятся вместе с классом в сертификате каждого изделия.



4. РЕЗУЛЬТАТЫ: СРАВНЕНИЕ ПОРОД

Было проверено одиннадцать пород, по $n = 20$ заготовок каждой. Результаты отчётливо разделились на три группы.

Не прошедшие испытание. Белый дуб (*Quercus alba*) показал худший результат: от 41 до 190 ppm железа и суммарная положительная восприимчивость у 14 из 20 заготовок. Причина знакома каждому, кто оставлял стальную струбину на влажном дубе на ночь: высокое содержание таннинов в дубе хелатирует железо с образованием танната железа -- иссиня-чёрного соединения железо-галловых чернил, -- и потому дуб активно концентрирует именно ту примесь, которую штрафует данная классификация. Дуб -- прекрасная древесина и магнитно враждебная. Орех и вишня показали себя лучше, но их средний класс всё равно составлял 4N или ниже.

Травы и композиты. Бамбук, который часто продают как экологичную «древесину», является травой с высоким содержанием кремнезёма и непредсказуемой химией узлов; его восприимчивость определялась минеральными включениями масштаба волокон, и устойчивый класс ему присвоить не удалось. Древесноволокнистая плита средней плотности (MDF) не прошла по совершенно другой оси: её карбамидоформальдегидное связующее сильно полярно, что даёт относительную диэлектрическую проницаемость от 4 до 6 и тангенс угла потерь на порядок выше, чем у цельной древесины, а производство делает плиту восприимчивой к внедрению металлической пыли. MDF исключается как материал опоры по диэлектрическим основаниям ещё до рассмотрения магнитного класса.

Результат тика. Плантационный тик (*Tectona grandis*), выращенный в пределах 5 deg от геомагнитного экватора, показал от 3 до 9 ppm Fe + Mn для 20 заготовок, суммарную диамагнитную восприимчивость каждого образца класс 5N в состоянии поставки. При отборе отдельных заготовок по VSM и ICP-MS требованиям 6N удовлетворила 31 из 340 проверенных заготовок, а требованиям 7N -- две. Преимущество экваториального тика не мистично: он быстро выращивается на управляемых плантациях с выщелоченными почвами, бедными железом, заготавливается молодым до глубокого накопления минералов в ядровой древесине и лишён таннин-железной химии, которая подводит дуб. Его диэлектрическая постоянная 2.1 при влажности 12 процентов -- самая низкая среди всех испытанных пород и приближается к показателям конструкционных пеноматериалов, применяемых в радиочастотной оснастке.

5. ПРОБЛЕМА ПОКРЫТИЯ

Класс древесины является свойством древесины, а не предмета, в который она превращается, -- и наиболее распространённый способ уничтожить хороший класс состоит в нанесении покрытия.

Почти все масляные, лессирующие и лаковые покрытия отверждаются металлическими сиккативами: солями кобальта, марганца и циркония с нафтенной или 2-этилгексановой кислотой, добавляемыми в долях процента для катализа окислительной сшивки, которая упрочняет плёнку. Кобальт и марганец парамагнитны, и содержание сиккатива всего 0.05 процента металла в расчёте на квадратный метр готовой поверхности вносит больше парамагнитной массы, чем содержится во всей лежащей под ней заготовке 5N. Мы измерили тиковый образец 5N до и после одного слоя обычного покрытия на основе варёного льняного масла: его приведённая к поверхности восприимчивость поднялась от диамагнитного базового уровня до суммарного положительного значения, переклассифицировав образец с 5N на класс ниже 4N. Древесина не изменилась. Покрытие вернуло загрязнение -- и поместило его точно на поверхности, в непосредственном контакте с кабелем, то есть в худшем возможном месте.

Таково измерительное, а не эстетическое основание поставлять блоки Equatorial Elevation Blocks без покрытия. Покрытие на последнем этапе и в наиболее магнитно активном месте свело бы на нет весь процесс отбора, благодаря которому заготовка получила свой класс. Серебристо-серая патина, которая с возрастом образуется на непокрытом тике, представляет собой элементарное окисление собственной поверхности древесины; она не добавляет парамагнитного металла и является косметическим изменением, но магнитно -- никаким событием.

6. АНИЗОТРОПИЯ ВОЛОКОН И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПУТЬ НАГРУЗКИ

Древесина диэлектрически анизотропна. На наших тиковых образцах относительная диэлектрическая проницаемость вдоль волокон превышала поперечную на 22-28 процентов при влажности 12 процентов, и тангенс угла потерь следовал той же оси. Физическая причина состоит в ориентированной трубчатой клеточной структуре и ориентации диполей связанной воды вдоль волокна. Для материала опоры эта анизотропия -- не помеха, которую следует усреднить, а конструктивная переменная.

Кабель лежит в желобе, выточенном на верхней грани каждого блока, поэтому доминирующая ёмкостная связь между кабелем и опорой проходит через короткий вертикальный столб древесины непосредственно под желобом. Обработывая каждый блок торцом вверх -- годичные кольца видны на верхней грани, а волокна идут вертикально вдоль пути нагрузки, -- мы ориентируем поперечную ось с меньшей проницаемостью в горизонтальную плоскость, где поле кабеля наиболее сильно, а продольную ось с большей проницаемостью оставляем для вертикального



несущего направления, где она не причиняет электрического вреда и приносит существенную механическую пользу. Первоначально ориентация торцом вверх была принята ради жёсткости при сжатии; диэлектрический довод в её пользу возник позднее из этих измерений и независимо подтвердил выбор.

Влажность определяет всю картину. И диэлектрическая проницаемость, и тангенс угла потерь резко растут с содержанием связанной воды, поэтому каждую классифицированную заготовку сушат в печи на месте происхождения до 12 +/- 1 процента, а регламент обслуживания предписывает ежегодную проверку влажности. Опора, набравшая влагу с 12 до 18 процентов, изменила свой диэлектрический вклад больше, чем его когда-либо изменит различие между породами.

7. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОД

Предлагаемая здесь шкала N-grade намеренно опирается на систему, которой читатель уже доверяет. Аудиофил, готовый платить за шестую девятку чистоты медного проводника, уже принял исходное положение: остаточные парамагнитные примеси и центры рассеяния, измеряемые в частях на миллион, заслуживают контроля. Мы лишь применили это положение и тот же класс измерений к материалу, на котором лежит проводник, -- и обнаружили, что привычка отрасли классифицировать металл до шести девяток, оставляя его на неклассифицированной, содержащей железо и активные таннины листовенной древесине, представляет собой асимметрию, которая не выдерживает произнесения вслух.

Экваториальный плантационный тик достигает нейтральности 5N в состоянии поставки и 6N после отбора по причинам совершенно прозаическим: условия роста с низким содержанием железа, ранняя заготовка, отсутствие таннин-железной химии, низкое содержание смол и общий со всей чистой древесиной диамагнитный базовый уровень. Это не волшебный материал. Это чистый материал, измеренный, классифицированный и оставленный без покрытия, чтобы таким и остаться. Каждый блок Equatorial Elevation Block поставляется с сертификатом, где указаны класс его заготовки, показатель Fe + Mn и измеренная восприимчивость. Мы предлагаем читателю запросить эквивалентные цифры у любого другого изготовителя аудиоопор и принять к сведению ответ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] James, W. L. (1975). Диэлектрические свойства древесины и оргалита: зависимость от температуры, частоты, влажности и ориентации волокон. USDA Forest Service Research Paper FPL-245, Forest Products Laboratory, Madison.
- [2] Torgovnikov, G. I. (1993). Диэлектрические свойства древесины и древесных материалов. Springer-Verlag, Berlin.
- [3] Skaar, C. (1988). Взаимодействие древесины и воды. Springer Series in Wood Science, Springer-Verlag, Berlin.
- [4] Cutter, B. E., Guyette, R. P. (1993). Анатомические, химические и экологические факторы, влияющие на применение древесины в дендрохимии. Journal of Environmental Quality, 22(3), 611-619.
- [5] Bosque, A., Ferro, M., Park, H. (2026). Классификация конструкционной древесины по магнитной нейтральности: приборы и границы классов. Journal of Equatorial Audio Science, 7(2), 44-71.
- [6] Tanaka, Y., Park, H. (2022). Измерение диэлектрической проницаемости анизотропных твёрдых тел с малыми потерями в экранированной ячейке с параллельными пластинами. Journal of Equatorial Audio Science, 3(1), 12-29.