



ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ И ДОВОД В ПОЛЬЗУ ТОРЦЕВОЙ ОРИЕНТАЦИИ: НАПРАВЛЕНИЕ ЁМКОСТНОГО ПУТИ НАГРУЗКИ В МАГНИТНО НЕЙТРАЛЬНЫХ ДЕРЕВЯННЫХ КАБЕЛЬНЫХ ОПОРАХ



Диэлектрическая анизотропия и довод в пользу торцевой ориентации: направление ёмкостного пути нагрузки в магнитно нейтральных деревянных кабельных опорах

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

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Аннотация

Деревянная кабельная опора является диэлектрическим телом в ближнем поле сигнального проводника, поэтому её вклад в инсталляцию представляет собой распределённую, зависящую от ориентации ёмкость, включённую параллельно кабелю. В основном исследовании классификации древесины по нейтральности (Bosque, Ferro, Park and Tanaka, 2026) ориентация волокон была определена как конструктивная переменная, а обработка торцом вверх выбрана на основании совокупного механического и диэлектрического довода, изложенного в единственном разделе. Настоящая сопутствующая работа развивает этот довод полностью. Древесина диэлектрически анизотропна: и относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_{rs_r} , и тангенс угла потерь $\tan \delta$ выше вдоль волокон, чем поперёк них; продольная ось превосходит две поперечные, поскольку геометрия трубчатых клеток -- трахеид и сосудов -- и диполи связанной воды, господствующие в поляризации, ориентированы вдоль волокна. Мы приводим измерения ϵ_{rs_r} и $\tan \delta$ экваториального тика по всем трём анатомическим осям (продольной L, радиальной R, тангенциальной T), выполненные анализатором импеданса с экранированной ячейкой с параллельными пластинами при влажности 8, 12 и 16 процентов в диапазоне от 20 Hz до 10 MHz; они подтверждают коэффициент анизотропии $\epsilon_{rs_L} / \epsilon_{rs_T}$ от 1.24 до 1.31 на звуковых частотах и при влажности 12 процентов. На основе этих постоянных мы строим модель распределённой ёмкости кабеля, лежащего в обработанном желобе над деревянным столбом, и рассчитываем ёмкостный вклад одного блока при обработке торцом вверх и пластью вверх: две ориентации различаются на измеримую величину, причём торцевая даёт меньшую приведённую к кабелю ёмкость, поскольку помещает поперечные оси с низкой проницаемостью в горизонтальную плоскость, где поле кабеля наиболее сильно, а продольную ось с высокой проницаемостью оставляет для вертикального пути нагрузки, где она электрически безвредна и механически идеальна. Развёртка по углу волокон обнаруживает минимум связи при истинной торцевой ориентации. В заключение мы отмечаем, что торцевая ориентация первоначально была специфицирована ради жёсткости при сжатии, а диэлектрический довод, полученный независимо и позднее, согласуется с механическим вплоть до его подтверждения.

1. ВВЕДЕНИЕ

Кабельная опора не переносит сигнал. Она находится рядом с ним. Именно поэтому её электрическую роль так легко отвергнуть: деревянный блок под кабелем явно не включён в цепь, и соблазнительно заключить, что его состав, волокна и ориентация -- дело краснодеревщика, а не инженера. Основная работа о классификации нейтральности (Bosque, Ferro, Park and Tanaka, 2026) изложила магнитную половину довода: опора, непрерывно соприкасающаяся с проводником, входит в ближнее поле проводника, а её остаточное содержание парамагнитных примесей является измеримым, а не декоративным параметром инсталляции. Диэлектрическую половину она исчерпала одним разделом. Настоящая работа -- тот раздел, развёрнутый до объёма, которого заслуживает физика.

То электрическое обстоятельство, что блок находится рядом с кабелем, а не внутри него, не исключает блок из цепи; оно определяет способ связи. Диэлектрическое тело в поле проводника ёмкостно запасает энергию, а распределённая ёмкость, параллельная линии передачи, представляет собой малую, но реальную нагрузку, величина которой зависит от диэлектрической проницаемости тела и от ориентации этой проницаемости относительно поля. Древесина не является изотропным диэлектриком. Её проницаемость зависит от направления, и поэтому деревянная опора обладает не одним, а тремя диэлектрическими вкладами, выбираемыми на фрезерном столе углом распила заготовки.

Утверждение настоящей работы узко и количественно. Оно состоит в том, что заданная для блока Equatorial Elevation Block ориентация торцом вверх -- годичные кольца на верхней грани, волокна идут вертикально по пути нагрузки -- минимизирует приведённую к кабелю ёмкость блока, что минимум измерим, а не номинален, и совпадает с ориентацией, уже выбранной по механическим основаниям. Мы не утверждаем, что эффект велик. Мы утверждаем, что у него есть знак, величина и предпочтительное направление и что изготовитель, обработавший блок иначе ради более красивого рисунка пласти, сдвинул число в неверную сторону, даже не подозревая о существовании этого числа.

2. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ ДРЕВЕСИНЫ

Древесина представляет собой ячеистое твёрдое тело из длинных полых клеток, ориентированных вдоль общей оси: трахеид у хвойных, волокон и сосудов у лиственных пород, таких как тик; длинная ось клеток определяет направление волокон. Эта геометрия лежит в основе механической анизотропии, знакомой каждому столюру, и в



равной степени -- в основе менее известной, но столь же реальной и давно документированной диэлектрической анизотропии (James, 1975; Torgovnikov, 1993).

Три механизма делают проницаемость зависимой от направления, и все три благоприятствуют продольной оси. Во-первых, сами клеточные стенки образуют непрерывные поляризуемые пути вдоль волокон и прерывистые поперёк него, поэтому межфазная поляризация (Максвелла--Вагнера) на многочисленных границах стенки и полости преимущественно накапливается вдоль волокон. Во-вторых, связанная вода в клеточных стенках -- доминирующий вклад в проницаемость древесины при всех состояниях, кроме самых сухих, -- находится в среде, где гидроксильные центры и микрофибриллярный каркас сами ориентированы вдоль волокон, поэтому ориентационная поляризация диполей связанной воды легче вдоль волокон, чем поперёк. В-третьих, два поперечных направления, радиальное R и тангенциальное T , отличаются друг от друга лишь немного, и оба лежат значительно ниже продольного значения L . Результат, неизменно наблюдаемый в литературе, выражается порядком $\epsilon_{ps_L} > \epsilon_{ps_R} \sim \epsilon_{ps_T}$, с тем же порядком тангенса угла потерь и коэффициентом анизотропии $\epsilon_{ps_L} / \epsilon_{ps_T}$, обычно составляющим от 1.2 до 1.5 для умеренных и тропических лиственных пород в гигроскопическом диапазоне.

Абсолютные значения невелики и определяются влажностью. Абсолютно сухая древесина имеет $\epsilon_{ps_r} = 2-3$, а с ростом влажности значение резко и монотонно повышается, поскольку каждая добавочная доля связанной воды пополняет запас диполей, доступных для поляризации. Из-за этой крутизны именно влажность, а не порода, является главным рычагом диэлектрического вклада опоры, и она рассматривается в разделе 5. Для довода об анизотропии существенен структурный, а не численный факт: направление наибольшей проницаемости совпадает с направлением волокна, а это направление задаёт столяр, не дерево.

3. ИЗМЕРЕНИЕ: ПРОНИЦАЕМОСТЬ И ПОТЕРИ ВДОЛЬ ТРЁХ ОСЕЙ

Мы измерили ϵ_{ps_r} и $\tan \delta$ на обработанных тиковых образцах, вырезанных вдоль каждой из трёх анатомических осей, так что поле ячейки с параллельными пластинами поочерёдно проходило через образец продольно, радиально и тангенциально. Образцы представляли собой квадраты со стороной 40 mm и толщиной 3.0 mm, с плоскими параллельными гранями в пределах ± 10 микрон; они были вырезаны из трёх заготовок экваториального тика класса 5N, отобранных по основному протоколу, чтобы магнитное загрязнение не искажало диэлектрическое показание. Каждый набор образцов кондиционировали до равновесия при трёх значениях влажности -- 8, 12 и 16 процентов -- в климатических камерах, а влажность после измерительного цикла проверяли гравиметрически относительно массы в абсолютно сухом состоянии.

Применялась экранированная ячейка с параллельными пластинами типа, описанного ранее (Tanaka and Park, 2022), возбуждаемая анализатором импеданса Keysight E4990A в диапазоне от 20 Hz до 10 MHz. Охранное кольцо подавляет краевые поля, благодаря чему измеренная ёмкость соответствует определённой площади электрода, а извлечённая проницаемость является объёмным значением материала, а не оценкой, загрязнённой краевым эффектом; тангенс угла потерь считается непосредственно как коэффициент диссипации ячейки. Контакт обеспечивали тонкими прослойками проводящего эластомера, компенсирующими остаточную шероховатость обработанных граней без клея, который внёс бы собственную поляризацию.

При влажности 12 процентов и частоте 1 kHz тик показал $\epsilon_{ps_L} = 2.64$, $\epsilon_{ps_R} = 2.09$ и $\epsilon_{ps_T} = 2.02$, коэффициент анизотропии $\epsilon_{ps_L} / \epsilon_{ps_T} = 1.31$ и $\epsilon_{ps_L} / \epsilon_{ps_R} = 1.26$; две поперечные оси, как и ожидалось, совпали в пределах 4 процентов. Тангенс угла потерь следовал тому же порядку: $\tan \delta$ составлял 0.021 вдоль волокон и 0.014-0.015 поперёк. В звуковом диапазоне от 20 Hz до 20 kHz проницаемости оставались постоянными в пределах 3 процентов, а коэффициент анизотропии удерживался между 1.24 и 1.31. Повышение влажности до 16 процентов подняло все значения -- ϵ_{ps_L} достигла 3.08 -- и, что примечательно, слегка расширило анизотропию, поскольку добавленная связанная вода преимущественно поляризуется вдоль благоприятной оси. Сушка до 8 процентов уменьшила и абсолютные значения, и коэффициент. Таким образом, анизотропия -- не фиксированная постоянная материала, а величина, модулируемая влажностью: она сильнее всего там, где это наименее желательно (во влажном состоянии), и слабее всего в наиболее сухом материале; при спецификации поставки 12 $\pm$ 1 процента она уверенно разрешается и остаётся стабильной.

4. МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ЁМКОСТИ ЖЕЛОБА, КАБЕЛЯ И СТОЛБА

Чтобы преобразовать три значения проницаемости в конструктивное решение, нужна геометрия связи. Кабель лежит не на плоском блоке, а в желобе -- неглубокой канавке с радиусным профилем, обработанной в верхней грани, -- поэтому конечная дуга кабельной оболочки отделена от древесины только толщиной стенки оболочки. Древесина непосредственно под этой дугой -- короткий вертикальный столб от дна желоба в тело блока -- находится там, где поле между проводником и любым удалённым возвратом на землю наиболее сильно и где запасается подавляющая часть ёмкости между кабелем и опорой. Более удалённая в стороны и вниз древесина вносит быстро убывающий вклад по мере расхождения и ослабления поля.



Мы моделируем систему как распределённую ёмкость на единицу длины трассы, интегрируя локальную энергию поля по объёму древесины под желобом и вокруг него с поосным учётом тензора проницаемости древесины. Построение стандартно для анизотропного диэлектрика: вертикальная составляющая поля выбирает проницаемость вертикальной оси, горизонтальные составляющие -- проницаемости горизонтальных осей; поскольку желоб концентрирует поле в почти вертикальной области непосредственно под проводником, а возвратные пути, замыкающие ёмкость, расходятся наружу и вниз через бока столба, горизонтальные проницаемости определяют большую долю запасённой энергии. Результат модели -- единственная величина, представляющая инженерный интерес: ёмкость, которую блок добавляет к кабелю, в пикофарадах на блок, как функция ориентации тензора проницаемости.

Практический интерес представляют две ориентации. При обработке торцом вверх продольная ось L направлена вертикально вдоль пути нагрузки, а две поперечные оси с низкой проницаемостью R и T лежат в горизонтальной плоскости. Обработка пластью вверх (тангенциальный распил, волокна горизонтальны) укладывает продольную ось L в горизонтальную плоскость, где её выбирают сильные горизонтальные составляющие поля, и ставит одну поперечную ось вертикально. Подстановка измеренных постоянных при влажности 12 процентов в модель типовой геометрии желоба (диаметр кабеля 12 mm, радиус желоба 3 mm, высота блока 60 mm, номинальный возврат на землю на расстоянии шасси) даёт приблизительно 1.9 pF на блок для торцевой ориентации и приблизительно 2.3 pF на блок для ориентации пластью -- разность около 0.4 pF, примерно 18 процентов, обусловленную исключительно углом распила. Для одного блока это мало. Но это реально, воспроизводимо, имеет один знак и обходится бесплатно: от изготовителя требуется лишь правильно ориентировать заготовку, а эффект накапливается по нескольким блокам полной трассы.

5. РАЗВЁРТКА ПО УГЛУ ВОЛОКОН И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ К ВЛАЖНОСТИ

Две названные ориентации являются концами непрерывного диапазона, и стоит подтвердить, что торцевая ориентация даёт истинный минимум, а не просто лучший из двух произвольных вариантов. Мы изготовили серию образцов с углами волокон от 0 deg (волокна вертикальны, истинная торцевая ориентация) через 30, 45, 60 до 90 deg (волокна горизонтальны, ориентация пластью) относительно оси нагрузки и измерили каждый в геометрии модели желоба с возбуждённым над ним проводником. Приведённая к кабелю ёмкость монотонно росла с углом волокон от торцевого минимума при 0 deg до максимума пласти при 90 deg, точно следуя весовой функции квадрата косинуса, которую предсказывает тензорная модель, когда продольная ось с высокой проницаемостью постепенно поворачивается в горизонтальное поле. Кривая полого около 0 deg -- ошибка обработки в несколько градусов почти ничего не стоит -- и наиболее крута в середине развёртки, поэтому наказание за по-настоящему небрежный распил больше, чем за несовершенный, но добросовестный. Минимум находится при истинной торцевой ориентации, и это минимум, а не точка перегиба.

Влажность сдвигает всю кривую вертикально, не перемещая минимум. Поскольку проницаемость резко растёт со связанной водой, блок, влажность которого ушла от 12 до 16 процентов, в абсолютном выражении добавляет больше ёмкости, чем вся разность между торцом и пластью при фиксированной влажности: рычаг влажности сильнее рычага ориентации. Но они независимы: увлажнение древесины поднимает основание, не меняя того, какая ориентация ниже. Поэтому ориентация и кондиционирование являются взаимодополняющими средствами контроля, и применять нужно оба. На этом измерении основаны сушка каждой классифицированной заготовки в печи на месте происхождения до 12 +/- 1 процента и ежегодная проверка влажности по регламенту обслуживания: ориентация навсегда задаётся обработкой и не может уплыть, но масштаб задающей её влажности может, и опора, оставленная уравниваться с влажной комнатой, медленно отдаёт запас, обеспеченный фрезерным столом.

Попутно отметим: измеренное в разделе 3 совпадение поперечных осей означает, что в пределах неопределённости измерения выбор между радиальной и тангенциальной ориентацией в горизонтальной плоскости несущественен; блок можно поворачивать вокруг вертикальной оси ради наилучшего вида колец на верхней грани без диэлектрических последствий при условии, что волокна остаются вертикальными.

6. ОБСУЖДЕНИЕ: ДВА ДОВОДА, ОДНА ОРИЕНТАЦИЯ

Торцевая ориентация была принята не ради диэлектрического поведения. Её приняли потому, что торец является самым жёстким и прочным способом нагрузить древесину на сжатие: при вертикальных волокнах направленная вниз нагрузка воспринимается вдоль трубчатых клеток в их самом прочном направлении, а блок сопротивляется статическому весу кабельной трассы и осадке инсталляции с наименьшей ползучестью и наименьшим изменением размеров. Это старое и бесспорное положение инженерии древесины, и оно зафиксировало спецификацию обработки прежде, чем была измерена какая-либо проницаемость.

Приведённые здесь диэлектрические измерения были выполнены позднее и в принципе могли не согласоваться с механическим выбором: ось вдоль волокон могла оказаться осью низкой проницаемости, и тогда её вертикальная ориентация была бы механически правильной, но электрически неверной, что вынудило бы к компромиссу.



Расхождения не возникло. Ось вдоль волокон является осью высокой проницаемости, поэтому её вертикальная постановка удаляет её из горизонтальной плоскости, где поле кабеля наиболее сильно, -- именно этого требует ёмкостная модель. Механически идеальная ориентация независимо оказывается диэлектрически самой тихой. Два довода были построены из разной физики, в разное время, людьми, решавшими разные задачи, и выбирают один и тот же распил.

Мы не придаём этому согласию мистического веса; у анизотропных материалов жёсткая ось часто совпадает с осью высокой проницаемости, поскольку оба свойства восходят к одной ориентированной микроструктуре, и тик относится к таким материалам. Но практическое следствие сохраняется. Изготовитель, следующий одному лишь механическому доводу, приходит к торцу и, сам того не желая, также минимизирует ёмкостную связь. Изготовитель, отменяющий механический довод ради декоративного рисунка пласти, проигрывает сразу по обоим показателям. Сходимость -- не столько совпадение, достойное восхищения, сколько причина доверять спецификации: когда две независимые цепочки рассуждений заканчиваются одним числом, это число с большей вероятностью верно.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Древесина является диэлектрически анизотропным телом, а деревянная кабельная опора -- этим телом в ближнем поле проводника. Её вклад в инсталляцию представляет собой небольшую распределённую ёмкость, величину которой изготовитель, осознанно или нет, устанавливает на фрезерном столе. Мы измерили трёхосную проницаемость и потери экваториального тика, подтвердили ожидаемый порядок $\epsilon_{ps_L} > \epsilon_{ps_R} \sim \epsilon_{ps_T}$ с коэффициентом анизотропии около 1.3 при влажности поставки и провели эти постоянные через ёмкостную модель желоба и столба к показателю качества -- пикофарадам на блок, -- который измеримо различается при обработке торцом и пластью. Торек даёт меньшее из двух значений примерно на 0.4 pF, или 18 процентов в типовой геометрии, а развёртка по углу волокон подтверждает, что это истинный минимум.

Запас мал для одного блока, и мы отказываемся его преувеличивать. Мы утверждаем только, что он реален, имеет предпочтительное направление и это направление уже задано по механическим основаниям. Блок Equatorial Elevation Block обрабатывается торцом вверх, потому что торек -- самый жёсткий способ воспринимать сжимающую нагрузку; приведённый здесь диэлектрический анализ был проведён позднее и подтверждает, что тот же распил является и диэлектрически самым тихим. Каждый блок поставляется торцом вверх, высушенным в печи до 12 ± 1 процента, без покрытия, с классом и измеренными постоянными в сертификате. Мы предлагаем читателю спросить у любого другого изготовителя деревянных опор, в каком направлении идут их волокна и почему.

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] Norimoto, M. (1976). Диэлектрические свойства древесины. Wood Research: Bulletin of the Wood Research Institute, Kyoto University, 59/60, 106-152.
- [5] Bosque, A., Ferro, M., Park, H., Tanaka, Y. (2026). Классификация конструкционной древесины по магнитной нейтральности: классификация чистоты N-grade для материалов аудиоопор. 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.