



ANIZOTROPIA DIELEKTRYCZNA I ARGUMENT ZA UKŁADEM CZOŁOWYM: ORIENTACJA POJEMNOŚCIOWEJ ŚCIEŻKI OBCIĄŻENIA W MAGNETYCZNIE NEUTRALNYCH DREWNIANYCH PODPORACH KABLI



Anizotropia dielektryczna i argument za układem czołowym: orientacja pojemnościowej ścieżki obciążenia w magnetycznie neutralnych drewnianych podporach kabli

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.

Abstrakt

Drewniana podpora kabla jest ciałem dielektrycznym utrzymywanym w polu bliskim przewodnika sygnałowego, dlatego jej wkładem do instalacji jest pojemność -- rozłożona, zależna od orientacji i połączona równolegle z kablem. W głównej pracy poświęconej klasom neutralności drewna (Bosque, Ferro, Park i Tanaka, 2026) orientację włókien uznano za zmienną projektową i przyjęto obróbkę z pionowym przebiegiem włókien, opierając ją na łącznym argumente mechanicznym i dielektrycznym przedstawionym w jednej części. Niniejsza praca towarzysząca rozwija ten argument w całości. Drewno jest dielektrycznie anizotropowe: zarówno względna przenikalność $\epsilon_{s,r}$, jak i tangens kąta strat $\tan \delta$ są większe wzdłuż włókien niż w poprzek, przy czym oś wzdłużna przewyższa dwie osie poprzeczne, ponieważ rurkowa geometria cewek i naczyń oraz dominujące w polaryzacji dipole wody związanej są ustawione zgodnie z włóknem. Przedstawiamy pomiary $\epsilon_{s,r}$ i $\tan \delta$ tekę równikowego wykonanego analizatorem impedancji w ekranowanej komórce z równoległymi płytkami wzdłuż wszystkich trzech osi anatomicznych (podłużnej L, promieniowej R i stycznej T), przy wilgotności 8, 12 i 16 procent oraz w zakresie od 20 Hz do 10 MHz; potwierdzają one współczynnik anizotropii $\epsilon_{s,L} / \epsilon_{s,T}$ od 1.24 do 1.31 dla częstotliwości audio i wilgotności 12 procent. Na podstawie tych stałych budujemy model rozłożonej pojemności kabla spoczywającego w wyfrezowanym gnieździe nad drewnianym słupem i obliczamy pojemnościowy wkład jednego bloku dla obróbki z włóknami pionowymi oraz równoległymi do lica: orientacje różnią się w mierzalnym stopniu, a układ czołowy daje mniejszą pojemność odniesioną do kabla, ponieważ umieszcza poprzeczne osie o małej przenikalności w płaszczyźnie poziomej, gdzie pole kabla jest najsilniejsze, i zachowuje podłużną oś o dużej przenikalności dla pionowej ścieżki obciążenia, gdzie jest elektrycznie nieszkodliwa i mechanicznie idealna. Przemiatanie kąta włókien lokalizuje minimum sprzężenia przy prawdziwym przekroju czołowym. Na koniec zauważamy, że układ czołowy określono pierwotnie ze względu na sztywność przy ściskaniu, a argument dielektryczny, uzyskany niezależnie i później, zgadza się z mechanicznym na tyle, by go potwierdzić.

1. WPROWADZENIE

Podpora kabla nie przewodzi sygnału. Znajduje się obok niego. Właśnie dlatego tak łatwo odrzucić jej rolę elektryczną: drewniany blok pod kablem bezsprzecznie nie leży w obwodzie, więc kuszący jest wniosek, że jego skład, przebieg włókien i orientacja są sprawą stolarza, nie inżyniera. Główna praca o klasach neutralności (Bosque, Ferro, Park i Tanaka, 2026) przedstawiła magnetyczną połowę argumentu -- materiał podporowy w ciągłym kontakcie z przewodnikiem należy do jego środowiska pola bliskiego, a szcztkowa zawartość składników paramagnetycznych jest mierzalnym parametrem instalacji, nie dekoracją. Połowę dielektryczną zamknęto w jednej części. Niniejsza praca jest tamtą częścią rozwiniętą do długości, na jaką zasługuje fizyka.

Fakt, że blok znajduje się obok kabla, a nie w jego wnętrzu, nie usuwa go z obwodu; wyznacza sposób sprzężenia. Ciało dielektryczne w polu przewodnika magazynuje energię pojemnościowo, a pojemność rozłożona równolegle do linii transmisyjnej stanowi małe, lecz rzeczywiste obciążenie, którego wielkość zależy od przenikalności ciała i jej orientacji względem pola. Drewno nie jest dielektrykiem izotropowym. Jego przenikalność zależy od kierunku, zatem drewniana podpora wnosi nie jeden, lecz trzy wkłady dielektryczne, wybierane na stanowisku obróbczym poprzez kąt przecięcia kantówki.

Teza niniejszej pracy jest wąska i ilościowa. Orientacja bloku Equatorial Elevation z włóknami ustawionymi pionowo -- słoje wzrostu na górnej powierzchni, włókna biegnące pionowo wzdłuż ścieżki obciążenia -- minimalizuje pojemność bloku odniesioną do kabla, minimum jest mierzalne, a nie wyłącznie pojęciowe, i pokrywa się z orientacją wybraną wcześniej na podstawie mechaniki. Nie twierdzimy, że efekt jest duży. Twierdzimy, że ma znak, wielkość i preferowany kierunek oraz że wytwórca, który dla ładniejszego rysunku drewna frezuje blok w przeciwnym kierunku, przesuwając liczbę w niewłaściwą stronę, nie wiedząc nawet, że liczba istnieje.

2. ANIZOTROPIA DIELEKTRYCZNA DREWNA

Drewno jest komórkowym ciałem stałym zbudowanym z długich, pustych i osiowo uporządkowanych komórek -- cewek u gatunków iglastych oraz włókien i naczyń u gatunków liściastych, takich jak tek -- których długa oś wyznacza przebieg włókien. Geometria ta jest źródłem anizotropii mechanicznej znanej każdemu stolarzowi, a w równym stopniu także słabiej znanej, lecz równie rzeczywistej i od dawna udokumentowanej anizotropii dielektrycznej (James, 1975; Torgovnikov, 1993).

Trzy mechanizmy uzależniają przenikalność od kierunku i wszystkie trzy faworyzują oś podłużną. Po pierwsze, same ściany komórkowe tworzą ciągłe ścieżki polaryzowalne wzdłuż włókien i przerywane w poprzek, dlatego polaryzacja międzyfazowa (Maxwella-Wagnera) na licznych granicach ściana-światło komórki gromadzi się preferencyjnie wzdłuż włókien. Po drugie,



woda związana utrzymywana w ścianach komórkowych -- dominujący składnik przenikalności drewna poza stanami najbardziej suchymi -- znajduje się w środowisku, którego grupy hydroksylowe i rusztowanie mikrofibrilne również są uporządkowane zgodnie z włóknem, więc polaryzacja orientacyjna dipoli wody związanej zachodzi łatwiej wzdłuż niż w poprzek. Po trzecie, dwa kierunki poprzeczne, promieniowy R i styczny T, różnią się tylko nieznacznie, a oba leżą wyraźnie poniżej wartości podłużnej L. Wynikiem, spójnym w całej literaturze, jest porządek $\epsilon_{L} > \epsilon_{R} > \epsilon_{T}$, taki sam porządek tangensa kąta strat oraz współczynnik anizotropii $\epsilon_{L} / \epsilon_{T}$ wynoszący zwykle od 1.2 do 1.5 dla umiarkowanych i tropikalnych gatunków liściastych w zakresie higroskopijnym.

Wartości bezwzględne są umiarkowane i zdominowane przez wilgotność. Drewno całkowicie suche pozostaje w pobliżu $\epsilon_{r} = 2$ do 3, po czym wartość gwałtownie i monotonicznie rośnie wraz ze wzrostem wilgotności, ponieważ każda dodatkowa ilość wody związanej wnosi dipole do zasobu polaryzowalnego. Ta stromość sprawia, że wilgotność, a nie gatunek, jest największą dźwignią dielektrycznego wkładu podpory; omawiamy ją w części 5. Dla argumentu anizotropii istotny jest punkt strukturalny, nie liczbowy: kierunkiem największej przenikalności jest kierunek włókien, a ten kierunek ustala stolarz, nie drzewo.

3. POMIAR: PRZENIKALNOŚĆ I STRATY WZDŁUŻ TRZECH OSI

Zmierzyliśmy ϵ_{r} i $\tan \delta$ na obrobionych próbkach teku wyciętych wzdłuż każdej z trzech osi anatomicznych, tak aby pole komórki z równoległymi płytkami przebiegało kolejno wzdłużnie, promieniowo i stycznie przez próbkę. Próbkę miały 40 mm boku i 3.0 mm grubości, a ich powierzchnie obrobiono płasko i równoległe z tolerancją ± 10 mikrometrów; wycięto je z trzech równikowych kantówek o klasie 5N, wybranych według głównego protokołu, aby zanieczyszczenie magnetyczne nie zakłócało odczytu dielektrycznego. Każdy zestaw próbek kondycjonowano w komorach wilgotnościowych do równowagi przy trzech poziomach wilgotności -- 8, 12 i 16 procent -- a po zakończeniu serii wilgotność sprawdzano grawimetrycznie względem masy po wysuszeniu w piecu.

Komórka była ekranowanym przyrządem z równoległymi płytkami typu opisanego wcześniej (Tanaka i Park, 2022), zasilanym przez analizator impedancji Keysight E4990A w zakresie od 20 Hz do 10 MHz. Pierścień ekranujący tłumi pole rozproszone, dzięki czemu zmierzona pojemność odpowiada określonej powierzchni elektrody, a wyznaczona przenikalność jest wartością objętościową materiału, nie oszacowaniem zanieczyszczonym efektem krawędziowym; tangens kąta strat odczytuje się bezpośrednio jako współczynnik rozproszenia przyrządu. Kontakt zapewniały cienkie przekładki z elastomeru przewodzącego, dopasowujące się do szczytkowej chropowatości obrobionych powierzchni bez użycia kleju, który wnosiłby własną polaryzację.

Przy wilgotności 12 procent i częstotliwości 1 kHz tek dał $\epsilon_{L} = 2.64$, $\epsilon_{R} = 2.09$ oraz $\epsilon_{T} = 2.02$, czyli współczynnik anizotropii $\epsilon_{L} / \epsilon_{T}$ równy 1.31 i $\epsilon_{L} / \epsilon_{R}$ równy 1.26; obie osie poprzeczne zgadzały się w granicach 4 procent, zgodnie z oczekiwaniem. Tangens kąta strat zachował ten sam porządek: $\tan \delta$ wynosił 0.021 wzdłuż włókien oraz od 0.014 do 0.015 w poprzek. W paśmie audio od 20 Hz do 20 kHz przenikalności pozostawały płaskie w granicach 3 procent, a współczynnik anizotropii utrzymywał się od 1.24 do 1.31. Podniesienie wilgotności do 16 procent zwiększyło każdą wartość -- wartość ϵ_{L} wzrosła do 3.08 -- i, co znamienne, nieco poszerzyło anizotropię, ponieważ dodatkowa woda związana polaryzuje się preferencyjnie wzdłuż uprzywilejowanej osi. Suszenie do 8 procent zmniejszyło zarówno wartości bezwzględne, jak i współczynnik. Anizotropia nie jest więc stałą materiałową, lecz wielkością modulowaną wilgotnością: najsilniejszą tam, gdzie ma najmniejsze znaczenie (w stanie mokrym), i najsłabszą, gdy materiał jest najbardziej suchy; przy specyfikacji dostawy 12 $\pm$ 1 procent pozostaje wyraźnie rozdzielona i stabilna.

4. MODEL ROZŁOŻONEJ POJEMNOŚCI GNIAZDA, KABLA I SŁUPA

Aby przełożyć trzy przenikalności na decyzję projektową, potrzebujemy geometrii sprzężenia. Kabel nie leży na płaskim bloku; spoczywa w gnieździe, płytkim zaokrąglonym rowku wyfrezowanym w górnej powierzchni, tak że skończony łuk płaszcza kabla dzieli od drewna jedynie grubość ścianki płaszcza. Drewno bezpośrednio pod tym łukiem -- krótki pionowy słup biegnący od dna gniazda w dół korpusu bloku -- znajduje się w miejscu, gdzie pole między przewodnikiem a odległym przewodem powrotnym do masy jest najsilniejsze i gdzie magazynowana jest zdecydowana większość pojemności między kablem a podporą. Drewno położone dalej na boki i w dół wnosi wkład o szybko malejącej wadze wraz z rozszerzaniem się i słabnięciem pola.

Modelujemy układ jako pojemność rozłożoną na jednostkę długości trasy, całkując lokalną energię pola w objętości drewna pod gniazdem i wokół niego, z tensorem przenikalności drewna wprowadzonym osobno dla każdej osi. Konstrukcja jest standardowa dla dielektryka anizotropowego: pionowa składowa pola próbkuje przenikalność osi pionowej, składowe poziome próbują przenikalności osi poziomych, a ponieważ gniazdo koncentruje pole w obszarze niemal pionowym bezpośrednio pod przewodnikiem, podczas gdy drogi powrotne zamykające pojemność biegną na zewnątrz i w dół przez boki słupa, przenikalności poziome odpowiadają za większą część zmagazynowanej energii. Wynikiem modelu jest pojedyncza wielkość o znaczeniu inżynierskim: pojemność dodawana do kabla przez blok, w pikofaradach na blok, jako funkcja orientacji tensora przenikalności.



Praktycznie istotne są dwie orientacje. Obróbka czołowa z włóknami pionowo umieszcza oś podłużną L pionowo, wzdłuż ścieżki obciążenia, i pozostawia dwie poprzeczne osie o małej przenikalności R i T w płaszczyźnie poziomej. Obróbka wzdłużna (cięcie płaskie, włókna poziomo) kładzie oś podłużną L w płaszczyźnie poziomej, gdzie próbują ją silne poziome składowe pola, i ustawia pionowo jedną oś poprzeczną. Wprowadzenie zmierzonych stałych dla wilgotności 12 procent do modelu reprezentatywnej geometrii gniazda (średnica kabla 12 mm, zaokrąglone gniazdo 3 mm, wysokość bloku 60 mm, nominalna płaszczyzna masy w odległości obudowy) daje około 1.9 pF na blok dla orientacji czołowej i około 2.3 pF na blok dla orientacji wzdłużnej -- różnicę bliską 0.4 pF, czyli około 18 procent, wynikającą wyłącznie z kąta cięcia. Dla jednego bloku to niewiele. Wartość jest jednak rzeczywista, powtarzalna, ma jeden znak i jest bezpłatna: kosztuje wytwórcę tylko decyzję o poprawnym ustawieniu kantówki i kumuluje się na kilku blokach pełnej trasy.

5. PRZEMIATANIE KĄTA WŁÓKIEN I CZUŁOŚĆ NA WILGOTNOŚĆ

Dwie nazwane orientacje są końcami kontinuum, dlatego warto potwierdzić, że układ czołowy jest prawdziwym minimum, a nie tylko lepszym z dwóch arbitralnych wyborów. Wykonaliśmy serię próbek o kątach włókien od 0 deg (włókna pionowo, prawdziwy przekrój czołowy), przez 30, 45 i 60, do 90 deg (włókna poziomo, przekrój wzdłużny) względem osi obciążenia i zmierziliśmy każdą w geometrii modelowego gniazda z zasilonym przewodem nad nią. Pojemność odniesiona do kabla rosła monotonicznie wraz z kątem włókien, od minimum układu czołowego przy 0 deg do maksimum układu wzdłużnego przy 90 deg, ściśle podążając za zależnością od kwadratu cosinusa przewidywaną przez model tensorowy, gdy podłużna oś o dużej przenikalności obraca się stopniowo do pola poziomego. Krzywa jest płaska w pobliżu 0 deg -- kilka stopni błędu obróbki kosztuje niemal nic -- i najbardziej stroma w środkowej części przemiatania, zatem kara za prawdziwie niestaranne cięcie jest większa niż za niedoskonałe, lecz podjęte w dobrej wierze. Minimum znajduje się przy prawdziwym przekroju czołowym i jest minimum, nie punktem przegięcia.

Wilgotność przesuwca całą krzywą pionowo, nie zmieniając położenia minimum. Ponieważ przenikalność gwałtownie rośnie wraz z ilością wody związanej, blok, którego wilgotność przesunęła się z 12 do 16 procent, dodaje bezwzględnie więcej pojemności niż cała różnica między orientacją czołową i wzdłużną przy stałej wilgotności -- dźwignia wilgotności jest większa niż dźwignia orientacji. Obie są jednak niezależne: zwilżenie drewna podnosi poziom bazowy, lecz nie zmienia tego, która orientacja jest najniższa. Orientacja i kondycjonowanie stanowią więc uzupełniające się środki kontroli i oba należy stosować. Jest to pomiarowa podstawa suszenia komorowego każdej sklasyfikowanej kantówki u źródła do 12 +/- 1 procent oraz corocznej kontroli wilgotności przewidzianej w harmonogramie konserwacji: orientację wycina się trwale i nie może dryfować, lecz wilgotność, która ją skaluje, może, a podpora pozostawiona do osiągnięcia równowagi z wilgotnym pomieszczeniem powoli oddaje margines uzyskany na stanowisku obróbczym.

Na marginesie zauważamy, że zgodność osi poprzecznych zmierzona w części 3 oznacza, iż wybór między prezentacją promieniową i styczną w płaszczyźnie poziomej jest nieistotny w granicach niepewności pomiaru; blok można obracać wokół osi pionowej dla najlepszego wyglądu słoików na górnej powierzchni bez konsekwencji dielektrycznych, pod warunkiem że włókna pozostają pionowe.

6. DYSKUSJA: DWA ARGUMENTY, JEDNA ORIENTACJA

Orientacji czołowej nie przyjęto ze względu na jej zachowanie dielektryczne. Przyjęto ją, ponieważ drewno z włóknami ustawionymi pionowo jest najsztywniejsze i najmocniejsze pod obciążeniem ściskającym: siła skierowana w dół przenosi się wzdłuż rurkowych komórek w ich najmocniejszym kierunku, a blok opiera się statycznej masie trasy kabla i osiadaniu instalacji z najmniejszym pełzaniem oraz najmniejszą zmianą wymiarów. Jest to stary i niekontrowersyjny fakt inżynierii drewna, który ustalił specyfikację obróbki przed jakimkolwiek pomiarem przenikalności.

Przedstawione tu pomiary dielektryczne wykonano później i mogły one zasadniczo zaprzeczyć wyborowi mechanicznemu -- oś wzdłuż włókien mogła być osią o małej przenikalności, przez co ustawienie jej pionowo byłoby poprawne mechanicznie, a błędne elektrycznie, i wymusiłoby kompromis. Nie zaprzeczyły. Oś wzdłuż włókien jest osią o dużej przenikalności, więc ustawienie jej pionowo usuwa ją z płaszczyzny poziomej, gdzie pole kabla jest najsilniejsze, dokładnie zgodnie z wymaganiem modelu pojemności. Orientacja idealna mechanicznie jest, niezależnie, orientacją najcichszą dielektrycznie. Oba argumenty zbudowano z odmiennej fizyki, w różnym czasie, przez ludzi rozwiązujących różne problemy, a wskazują to samo cięcie.

Nie przypisujemy tej zgodności mistycznego znaczenia; materiały anizotropowe często mają oś sztywną zgodną z osią dużej przenikalności, ponieważ obie właściwości wynikają z tej samej uporządkowanej mikrostruktury, a tek jest takim materiałem. Konsekwencja praktyczna pozostaje jednak ważna. Wytwórca kierujący się wyłącznie argumentem mechanicznym dochodzi do układu czołowego i nieumyślnie minimalizuje również sprzężenie pojemnościowe. Wytwórca, który dla dekoracyjnego rysunku drewna odrzuca argument mechaniczny, przegrywa jednocześnie na obu polach. Zbieżność nie jest tyle przypadkiem godnym zachwytu, ile powodem, by zaufać specyfikacji: kiedy dwie niezależne linie rozumowania kończą się na tej samej liczbie, prawdopodobieństwo poprawności liczby rośnie.



7. WNIOSKI

Drewno jest ciałem dielektrycznie anizotropowym, a drewniana podpora kabla jest tym ciałem utrzymywanym w polu bliskim przewodnika. Wnosi do instalacji małą pojemność rozłożoną, której wielkość wytwórca ustala -- świadomie lub nie -- na stanowisku obróbczym. Zmierzyliśmy trójosiową przenikalność i straty teku równikowego, potwierdziliśmy oczekiwany porządek $\epsilon_{ps_L} > \epsilon_{ps_R} \sim \epsilon_{ps_T}$ ze współczynnikiem anizotropii w pobliżu 1.3 przy wilgotności dostawy i przeprowadziliśmy te stałe przez model pojemności gniazda i słupa do wskaźnika jakości -- pikofaradów na blok -- który mierzalnie różni się między obróbką czołową a wzdłużną. Wartość dla układu czołowego jest niższa o około 0.4 pF i 18 procent w reprezentatywnej geometrii, a przemiatanie kąta włókien potwierdza, że stanowi prawdziwe minimum.

Margines jest niewielki dla pojedynczego bloku i nie zamierzamy go wyolbrzymiać. Twierdzimy jedynie, że jest rzeczywisty, ma preferowany kierunek, a kierunek ten został już określony z przyczyn mechanicznych. Blok Equatorial Elevation obrabia się z włóknami pionowo, ponieważ układ czołowy jest najszywniejszym sposobem przenoszenia obciążenia ściskającego; przedstawioną tu analizę dielektryczną podjęto później, a potwierdza ona, że to samo cięcie jest również najcichsze dielektrycznie. Każdy blok jest dostarczany czołem do góry, wysuszony komorowo do 12 +/- 1 procent, bez wykończenia, z klasą i zmierzonymi stałymi na certyfikacie. Zachęcamy czytelnika, by zapytał dowolnego innego producenta drewnianych podpór, w którym kierunku będą włókna w jego podporach i dlaczego.

BIBLIOGRAFIA

- [1] James, W. L. (1975). Właściwości dielektryczne drewna i płyt pilśniowych: zmienność wraz z temperaturą, częstotliwością, wilgotnością i orientacją włókien. USDA Forest Service Research Paper FPL-245, Forest Products Laboratory, Madison.
- [2] Torgovnikov, G. I. (1993). Właściwości dielektryczne drewna i materiałów drewnopochodnych. Springer-Verlag, Berlin.
- [3] Skaar, C. (1988). Relacje drewno-woda. Springer Series in Wood Science, Springer-Verlag, Berlin.
- [4] Norimoto, M. (1976). Właściwości dielektryczne drewna. Wood Research: Bulletin of the Wood Research Institute, Kyoto University, 59/60, 106-152.
- [5] Bosque, A., Ferro, M., Park, H., Tanaka, Y. (2026). Klasyfikacja magnetycznej neutralności drewna konstrukcyjnego: klasy czystości N dla materiałów podpierających przewody audio. Journal of Equatorial Audio Science, 7(2), 44-71.
- [6] Tanaka, Y., Park, H. (2022). Pomiar przenikalności anizotropowych ciał stałych o małych stratach za pomocą ekranowanej komórki z równoległymi płytkami. Journal of Equatorial Audio Science, 3(1), 12-29.