

POMIAR I ANALIZA PRZEPIYWU SYGNAŁU ELEKTRYCZNEGO PRZEZ PRZEWÓD,
ORAZ PORÓWNANIE DO MODELU WODNEGO.

Praca na konkurs Fizyczne Ścieżki 2023/2024.

Streszczenie

Celem pracy jest odpowiedzenie na pytanie „jak wyglada przeplyw sygnalu elektrycznego?”.

W tej pracy mierzymy prędkość propagacji sygnalu elektrycznego w przewodzie oraz dokonujemy wizualizacji przeplywu takiego sygnalu. Porównano również przeplyw sygnalu elektrycznego do powszechnie stosowanej w dydaktyce analogii do przeplywu wody w kanałach w zakresie przeplywu przez przewód. Pomiarów dokonano na dwóch skręconych ze sobą miedzianych przewodach rozpiętych na stryopianowej płycie. Łączna długość wykorzystanej skrętki to 20,8m. Do pomiarów wykorzystano również oscyloskop oraz zasilacz laboratoryjny. Prędkość propagacji sygnalu w badanym przewodzie określono na ok. 74% prędkości światła w próżni. Przeplyw sygnalu przez przewód okazuje się mieć wiele podobieństw do modelu wodnego. Przyrównanie modelu wodnego do elektrycznego przy nagłym podłączeniu przewodu do źródła zasilania nawet w skali pierwszych nanosekund okazuje się być dokładne.

Wstep

Wlaczajac lampe za pomoca przelacznika widzimy swiatla niemalze od razu. Mozemy wywnioskowac w takim razie, ze sygnal plynacy od przelacznika do lampy ma dosyc duza wartosc predkosci propagacji, ale jak duza? U niektórych panuje przekonanie, ze podrozuje on z predkoscia swiatla. Czy takie rozumowanie jest prawdziwe? Szukajac odpowiedzi na to pytanie rodzi sie wiecej interesujacych zagadek. Jak w ogole wyglada przeplyw sygnalu przez przewod? Oraz jak dokladna jest analogia do przeplywu wody w kanale tak czesto wykorzystywana do uczenia podstaw z zakresu elektrycznosci? Odpowiedzi na te pytania nie sa oczywiste. Czesto przeplyw pradu porownuje sie do przeplywu wody w kanale, co jest przydatne w dydaktyce. Gdzie to porownanie ma swoje granice? W tej pracy sprawdzimy jak dokladny jest model wodny do zobrazowania przeplywu pradu w skali pierwszych nanosekund od wlaczenia do zrodla napiecia. Bardzo popularne jest tlumaczenie przeplywu pradu elektrycznego poprzez porownanie z przeplywem wody przez kanały, badz układ rur (te dwa sposoby nieco sie od siebie roznią). W tej pracy bedziemy korzystac z porownania do kanału, poniewaz w naszym wypadku bedzie on lepszy do zobrazowania przeplywu fali. Warto tez powiedziec jakie konkretnie parametry sa analogiczne do obu sytuacji. Wysokosc wody w kanale jest naszym odpowiednikiem potencjalu. Stad warto zauwazyc, ze jesli jest roznicza potencjalow (wysokosci slupow cieczy) to musi nastapic przeplyw elektronow (czyli wody). Przewod bedziemy przedstawiac jako wlasnie kanal z wodą. Przewod ma jakas pojemnosc, ktora w modelu wodnym moze okreslac szerokosc kanału. Kondensator moglibysmy przedstawic w modelu wodnym jako dwa zbiorniki, a rezystor jako zwężenie. Istnieja jednak pewne roznicze pomiedzy modelem wodnym i elektrycznym. W modelu wodnym nie jesteśmy w stanie uwzględnic efektow zwiazanych chociazby z indukcia. W zwiazku z tym samoindukcja w przeplywie wody przez kanały nie wystepuje, aczkolwiek w naszym eksperymencie (poprzez rozpięcie przewodow na spore

odległości od siebie) ten efekt jest pomijalny. W tej pracy skupimy się głównie na pierwszych nanosekundach od rozpoczęcia przepływu prądu.

Dokładna analiza pytań

Praca ma na celu odpowiedź na dwa konkretne pytania. Będą to „Jak bardzo przepływ sygnału elektrycznego jest podobny do przepływu wody przez kanał?” oraz „Z jaką prędkością propaguje się sygnał elektryczny w przewodzie?”. Do udzielenia odpowiedzi najpierw należy dobrze je zrozumieć. Postawione we wprowadzeniu pytania są nie do końca dobrze postawione. Nie zostało jasno sformułowane co rozumiemy jako sygnał elektryczny, czym jest prędkość sygnału, bądź czym konkretnie jest model wodny. Poniżej zostały wyjaśnione te pojęcia

Model wodny

Mówiąc o modelu wodnym w całej pracy mamy na myśli system kanałów o nieskończonej głębokości wypełnionych do jakiegoś stopnia wodą. W tym modelu przepływ cząsteczek wody jest analogią do przepływu elektronów. Co istotne w tej pracy wykorzystujemy tylko model wodny określony jako przepływ wody przez kanały, gdyż fale na powierzchni wody są o wiele prostsze niż byłoby zaobserwować ciśnienie w modelu, gdzie woda przepływa przez rury. Taki sposób tłumaczenia przepływu prądu również jest powszechny.

Sygnał elektryczny

Czym jest tak naprawdę sygnał, którego prędkość chcemy zmierzyć? Wbrew powszechnemu przekonaniu prędkość, o której mówimy nie jest związana z prędkością przemieszczania się elektronów (prędkością dryfu), lecz prędkością propagacji pola elektrycznego. Zasilacz w naszym przypadku jest źródłem napięcia, które powoduje przesunięcie ładunków na samym początku kabla. To powoduje zmianę pola elektrycznego,

które przesuwa kolejne elektrony itd. Propagacja takiego pola w próżni przebiega z prędkością światła. Jest to oczywiście spowodowane definicją prędkości światła, które jest polem elektromagnetycznym. Jednak w przewodzie nie mamy do czynienia z próżnią, lecz z jakimś przewodnikiem (w naszym przypadku miedzią). Na szybkość propagacji sygnału w takim przewodzie mogą wpływać różne czynniki takie jak materiał z jakiego jest wykonany, pojemność przewodu oraz jego indukcyjność. Według jednej z definicji ze słownika języka polskiego sygnał to „przebieg jakiejś wielkości fizycznej z nadajnika do odbiornika”. W tej pracy sygnał elektryczny określamy jako przebieg wzrostu napięcia elektrycznego między dwoma przewodami wzdłuż ich długości. To właśnie napięcie powoduje przepływ prądu, a więc o nie nam chodzi kiedy zadajemy pytanie „jak szybko doleci sygnał od włącznika do żarówki?”. Warto zaznaczyć, że przepływ wody przez kanał nie jest analogią do przepływu prądu elektrycznego, a propagacji pola elektrycznego. Prąd elektryczny to uporządkowany (ukierunkowany) ruch cząstek obdarzonych ładunkiem elektrycznym, które to poruszają się tak jak wcześniej zostało wspomniane z prędkością dryfu, która jest zazwyczaj wiele rzędów wielkości mniejsza od prędkości propagacji sygnału. Tak samo prędkość fali na powierzchni wody jest zazwyczaj o wiele większa niż przepływ samych cząsteczek wody (mówiąc o sytuacji w standardowym kanale).

Prędkość sygnału elektrycznego

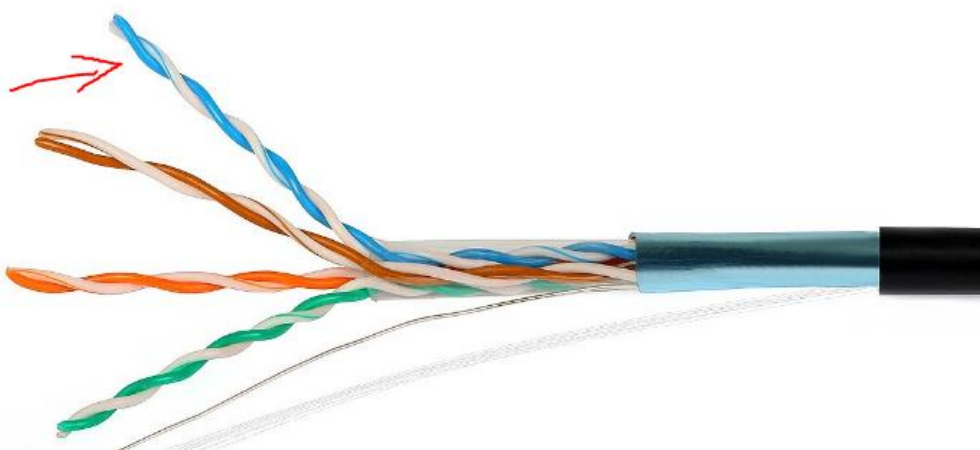
Prędkość sygnału możemy w prosty sposób zdefiniować jako prędkość jaka byłaby potrzebna na przebycie odległości równej długości przewodu w czasie jaki zostaje zmierzony pomiędzy wzrostem potencjału na początku i końcu przewodu. W pracy do tego został wykorzystany oscyloskop, którym wyznaczano początek wzrostu potencjału w miejscu wszczęcia sondy. Ten moment oznacza „dotarcie sygnału”. Dokładniej opisane zostaje to w rozdziale „Metoda”.

Metoda

Do przeprowadzenia wszystkich pomiarów wykorzystany został oscyloskop SIGLENT SDS 1202X-E 200 MHz 1 Gsa/s. Źródłem napięcia był zasilacz laboratoryjny WANPTEK, przy prawie wszystkich pomiarach (jedyne wyjątki będą jasno wspomniane w pracy) wykorzystywane napięcie to 5V. Z kabla ethernetowego wypruto pojedynczą skrętkę (dwa skręcone ze sobą miedziane druty w izolacji), która została rozłożona na styropianowej płycie



Rysunek 1 Narzędzia wykorzystane do przeprowadzenia pomiarów



Rysunek 2 Kabel ethernetowy

i przymocowana za pomocą gwoździ. W całej pracy skrętką nazywamy dwa miedziane przewody w izolacji skręcone ze sobą (na rysunku 2 wskazane czerwoną strzałką). Średnica

przekroju pojedynczego przewodu miedzianego została zmierzona na $(37 \pm 0.01)mm$ (bez izolacji). Szerokość płyty styropianowej, na której zostały rozpięte przewody wynosi ok. 75cm. Całkowita długość skrętki została zmierzona za pomocą taśmy metrowej na 20,8m. Dokładność tego pomiaru szacujemy na $\pm 0,1m$. Na uzyskanie dokładniejszej wartości długości przewodu powinna zostać uwzględniona jeszcze dodatkowa długość związana ze skręceniem przewodu.

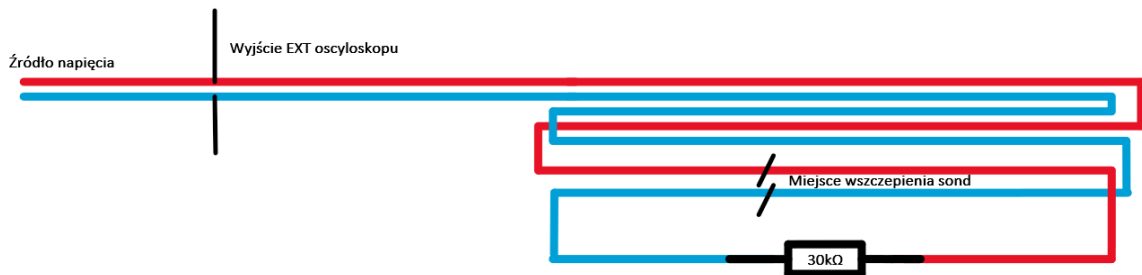
Wykorzystane przyrządy:

- Oscyloskop SIGLENT SDS1202X-E o częstotliwości próbkowania 1Gsa/s czyli 1mln próbek na sekundę, aczkolwiek do pomiarów stosowano tylko tryb 500Msa/s, czyli 5mln próbek na sekundę o dokładności do 0,08V;
- Zasilacz laboratoryjny WANPTEK o maksymalnym napięciu 60V i maksymalnym prądzie 5A.
- Sondy oscyloskopowe;
- Dwuprzewodowa skrętka wyciągnięta z kabla ethernetowego o łącznej zmierzonej długości 20,8m z przyłutowanym rezystorem $30k\Omega$ pomiędzy dwoma końcami.
- Płyta styropianowa z wbitymi gwoździemi służącymi do rozłożenia równomiernie skrętki;
- Kable ze złączem krokodylkowym służące do połączenia zasilacza z drutem.

Sposób przeprowadzania pomiarów

W skrętce co ok. 70 cm wykonano wcięcia w izolacji umożliwiające podpięcie sond oscyloskopu (na poniższym schemacie przedstawiono tylko jedno miejsce takiego wcięcia). Napięcie na sondach jest mierzone względem uziemienia wyjścia EXT oscyloskopu. W związku z możliwością zmiany potencjału w miejscu uziemienia rzeczą, która rzeczywiście będzie nas interesować będzie napięcie pomiędzy jedną a drugą sondą, czyli różnica dwóch pomiarów. Dwa przewody (na schemacie czerwony i czarny) są połączone tylko na samym

końcu opornikiem $30k\Omega$ w celu wykluczenia sił elektromotorycznych indukowanych przez otoczenie, co zakłócało pomiary.



Rysunek 3 Schemat układu eksperymentalnego

Sam opornik nic nie zmienia w naszym układzie. Jedyne co powoduje to zapewnienie zerowego napięcia między przewodem zerowy oraz niebieskim przed podłączeniem zasilacza. W momencie zarejestrowania wzrostu napięcia na wyjściu EXT oscyloskop robi stopklatkę. Ten moment będziemy określać jako czas $t = 0s$.

POMIAR PRĘDKOŚCI PROPAGACJI POŁA ELEKTRYCZNEGO W PRZEWODZIE

Aby przeprowadzić pomiar prędkości propagacji sygnału w przewodzie przeprowadzono dwa pomiary napięcia. W kolorze jasnoniebieskim przedstawiono pomiar napięcia na samym początku skrętki (wykreślona krzywa jest już obliczoną różnicą



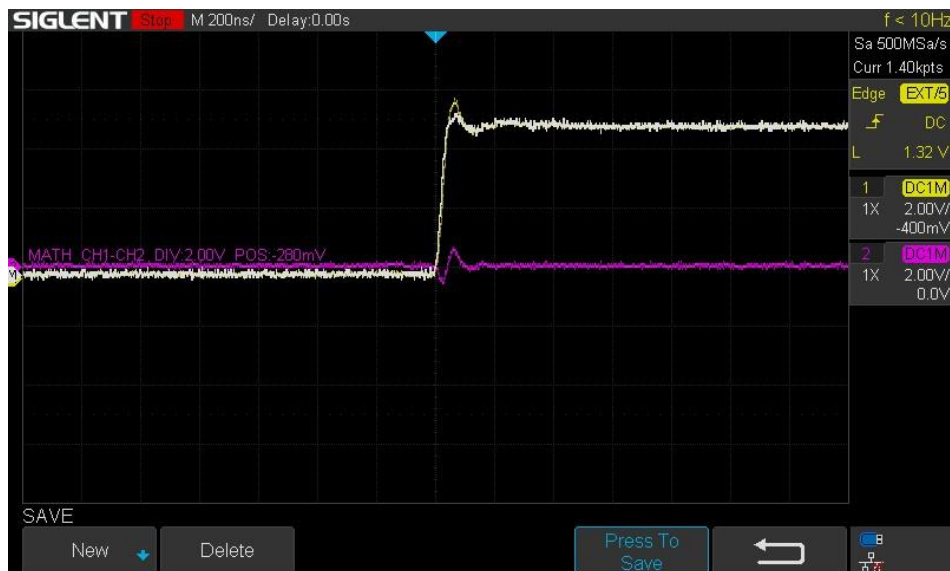
pomiarów pierwszej i drugiej sondy), a w kolorze niebieskim została wykreślona zależność napięcia od czasu na samym końcu skrętki. Źródło napięcia ustawiono na 5V. Możemy zauważyć, że kształty dwóch wykreślonych krzywych różnią się od siebie. Napięcie mierzone na początku przewodu rośnie szybko. Za to napięcie na końcu przewodu rośnie mniej chaotycznie oraz co ciekawe osiąga maksymalną wartość wyższą niż napięcie na początku przewodu, które jednak po krótkim czasie wyrównuje się. Poniższy pomiar wskazuje, że pole elektryczne w pewnym sensie mogłoby „płynąć” przez przewód, aż nie napotka ściany, od której musi się odbić. O tym jednak powiemy więcej w dalszej części pracy. Za pomocą kursorów oscyloskopu zmierzono różnice w czasie pomiędzy początkami dwóch wzrostów napięć, która została wyznaczona jako $\Delta t = 88\text{ns} \pm 1\text{ns}$ (niepewność wynika z ograniczeń oscyloskopu). Korzystając ze wzoru na średnią prędkość $v = \frac{\Delta S}{\Delta t}$, gdzie

ΔS to długość całego przewodu (co ważne, tylko jednego przewodu z dwóch obecnych w skętce). Przyjmując tą długość jako $\Delta S = 20,8m$ (przy czym niepewność tego pomiaru szacujemy na $0,1m$). Możemy obliczyć średnią prędkość propagacji pola elektrycznego w testowanym przewodzie $v = (2,36 \pm 0,04) \cdot 10^8 \frac{m}{s}$. Porównując ten wynik z prędkością światła w próżni (przyjmujemy ją jako $c = 299\,792\,458 \frac{m}{s}$) można obliczyć, że prędkość sygnału w testowanym kablu wynosi około 78,8% wartości prędkości c .

Taki sam pomiar wykonano również dla napięcia na źródle równym 60V. Kształty fal różniły się bardzo nie znacznie od tych uzyskanych w pomiarze dla 5V, a wartość Δt została zmierzona dokładnie taka sama. Według tych obserwacji można wykluczyć, żeby wartość prędkości sygnału elektrycznego zależała od podanego napięcia.

Obrazowanie przepływu sygnału elektrycznego przez przewód

Korzystając z zestawu eksperymentalnego dokonano pomiary w 27 miejscach odległych o ok. 70cm (licząc po długości przewodu). Każdy pomiar wykonywano wykorzystując napięcie 5V na zasilaczu. Poniżej znajdują się dwa wykresy przedstawiające wykres napięcia na początku (wykres 1) oraz na końcu (wykres 2) skętki. Żółta linia pokazuje potencjał mierzony przez sondę przyczepioną do przewodu podłączonego do dodatniej elektrody zasilacza, a różowy przez sondę podłączoną do przewodu podłączonego do ujemnej elektrody zasilacza. Biała linia to różnica pomiaru jednej i drugiej sondy (napięcie między nimi)



Rysunek 4 Pomiar napięcia na początku skrętki



Rysunek 5 Pomiar napięcia na końcu skrętki

Warto zauważyć, że na wykresie nr 1 potencjały mierzone na obu sondach rosną zanim napięcie między nimi zacznie wzrastać. Jest to spowodowane tym, że wartości mierzone przez sondy są w rzeczywistości napięciem między sondom, a uziemieniem oscyloskopu, które znajduje się na samym początku przewodu.

Wizualizacja pomiarów

Wszystkie pomiary zgrano z oscyloskopu, a następnie korzystając z języka python oraz biblioteki matplotlib, stworzono animację w formacie .gif widoczną poniżej. Oś pionowa wskazuje napięcie pomiędzy dwoma przewodami skrętki. Oś pozioma to numer wcięcia (im mniejszy indeks tym bliżej źródła prądu). Cały wykres jest animowany w czasie (z powodu ograniczeń formatu pdf animacja gif dostępna pod adresem <http://www.filipmazurek.pl/pole1.gif>). Cała animacja od początku do końca obejmuje czas 2800ns.

Wykonano również podobny eksperyment z wodą w „kanale” w małej skali. Wcześniej wspomniany kanał został sklejony z płyty plexiglas. Kanał posiada wpływ (z lewej strony na animacji), a z drugiej strony zakończony jest ścianą. Długość kanału to 17cm, maksymalna głębokość to 9cm, a jego szerokość to 2cm, aczkolwiek podane wartości wielkości liniowych są mało dokładne z powodu ręcznego wykonania modelu. Do eksperymentu została wykorzystana woda z niewielkim dodatkiem barwnika. Nagranie zostało spowolnione do 20% oryginalnej prędkości oraz zwiększono w nim kontrast (z powodu ograniczeń formatu pdf animacja gif dostępna pod adresem [dostępna również pod adresem http://www.filipmazurek.pl/pole2.gif](http://www.filipmazurek.pl/pole2.gif)).

Dyskusja wyników

Prędkość sygnału elektrycznego

Widać sporo podobieństw pomiędzy dwoma eksperymentami, aczkolwiek zacznę od wymienienia zauważonych różnic i możliwych wyjaśnień na ich występowanie. Najbardziej widoczną różnicą jest mocno widoczne odbicie się pierwszej fali w modelu wodnym. Należy brać pod uwagę, że wykorzystany w modelu wodnym zbiornik dostarczający wodę ma ograniczone wymiary.

Różnice

Mogą mieć wpływ również efekty związane z siłami elektrostatycznymi w wodzie (sprzyja temu mała szerokość kanału). Generalnie powierzchnia wody po wpłynięciu do kanału zdaje się być bardziej „ruchliwa”. Widoczne występowanie fal w modelu wodnym, być może również byłoby dobrze widoczne w modelu elektrycznym, gdyby wykorzystać przewód o innych wymiarach.

Możliwe wyjaśnienie różnic

Różnice pomiędzy dwoma modelami mogą występować z powodu sił elektrostatycznych wody, indukcji oraz wymiarów zarówno przewodu jak i kanału skonstruowanego na potrzeby eksperymentu. Być może przy przeprowadzeniu eksperymentu w innej skali wyniki byłyby bardziej zbliżone. W modelu wodnym mogą występować różne nie widoczne efekty związane z wirowaniem wody, co w modelu elektrycznym nie może mieć miejsca.

Podobieństwa

Przechodzą teraz już do podobieństw, to rzeczywiście zasilacz zdaje się wprowadzać pole elektryczne, które wpływa niczym woda do przewodu aż do momentu napotkania końca. Wtedy napięcie na samym końcu rośnie aż do 7V co jest o 2V więcej niż napięcie zasilacza.

Tak samo w modelu wodnym ciecz wpływa do kanału, napotyka ścianę przy czym pęd powoduje, że poziom wody przy ścianie rośnie znacznie wyżej niż początkowa wysokość.

Konkluzje

Prędkość sygnału elektrycznego

Wyniki obserwacji pokazują, że sygnał elektryczny rzeczywiście porusza się z dużą prędkością, aczkolwiek w skrętce dwóch miedzianych przewodów osiąga prędkość zaledwie 78,8% prędkości światła w próżni. Należy pamiętać, że mówimy tu o prędkości sygnału w parze przewodów. Zarówno ich rozmiary, materiał, kształt, jak i inne parametry mogą mieć wpływ na mierzoną prędkość. Jednak wbrew opinii części osób nie porusza się on z prędkością c .

Porównanie modelu wodnego do przepływu prądu elektrycznego

Sygnał elektryczny zdaje się zachowywać podobnie do modelu wodnego (przynajmniej w warunkach przeprowadzania eksperymentu). Porównanie modelu wodnego do prądu elektrycznego jest wydajnie odzwierciedlać w skali pierwszych nanosekund. Okazuje się, że nawet w takiej skali prąd elektryczny można wyobrazić sobie z dobrym przybliżeniem jako wodę w kanale.

Podziękowania

Dziękuję Majuni za bycie Majunią oraz moim rodzicom za wyposażenie mnie we wszystkie potrzebne do wykonania tej pracy przyrządy i materiały.

Bibliografia

Hayt, William Hart (1989). *Engineering electromagnetics*.

Halliday David, Resnick Robert, Walker Jearl (2015). *Podstawy fizyki tom 1-5*.

Wikipedia contributors. (2024, January 25). *Speed of electricity*. In *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Styczeń 31, 2024, pod adresem

https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Speed_of_electricity&oldid=1198788146