ON4CRD

Svazek 05

Výpočet filtrů



Radio Club Durnal ON4CRD

https://on4crd.be

Právní upozornění

Svazek 05 · Výpočet filtrů

Vydavatel webových stránek : Radio Club Durnal ON4CRD

Manažer publikace : Výbor Radio Club Durnal ON4CRD

https://on4crd.be

Právní upozornění

Duševní vlastnictví

Texty, obrázky, dokumenty, loga a materiály zveřejněné na těchto stránkách zůstávají majetkem příslušných autorů nebo klubu. Jakákoli reprodukce nebo opětovné použití musí respektovat zdroj, příslušná práva a veškerá svolení autora.

Odpovědnost

Klub pracuje na zveřejňování užitečných a ověřených informací, ale nezaručuje absenci chyb, opomenutí nebo přerušení. Technické nebo regulační informace musí být porovnány s oficiálními zdroji, pokud podporují rozhodnutí.

Ilustrace vytvořené s pomocí umělé inteligence.

Nový úkol



Po dílně o elektřině Lucas v klubu znovu otevírá zápisník.



Henri připravuje ukázku kvality signálů.



Na stole čekají dva kondenzátory a cívka.



Úkol zní: pochopit, vypočítat a změřit dolní propust.



Mladík chce vědět, co dokážou změnit tři součástky.

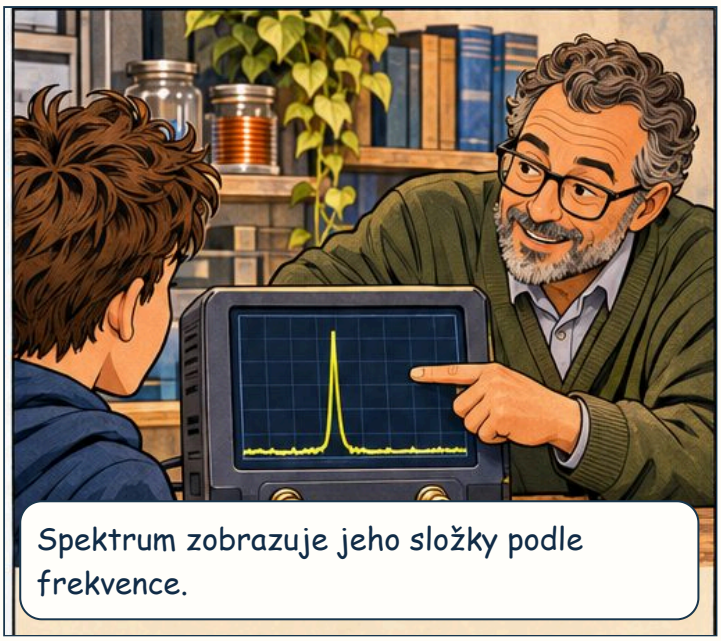


Nejprve prozkoumají, co signál obsahuje.

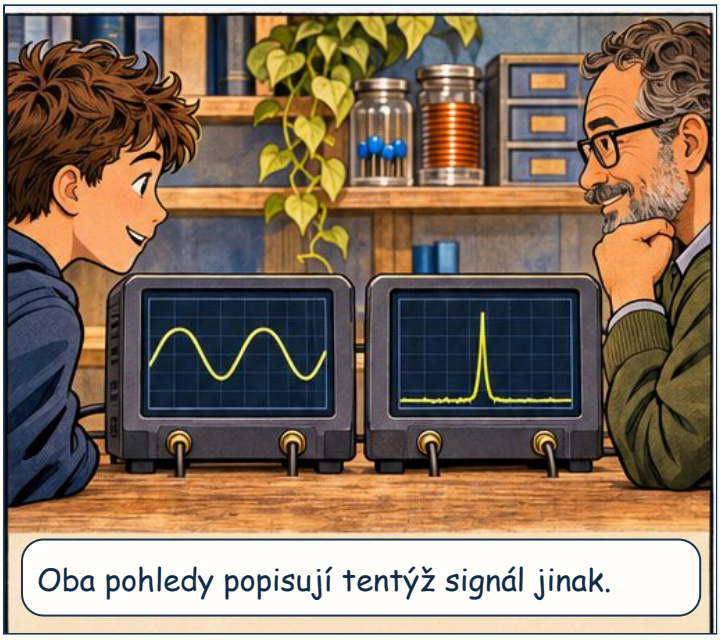
Signál a jeho obraz



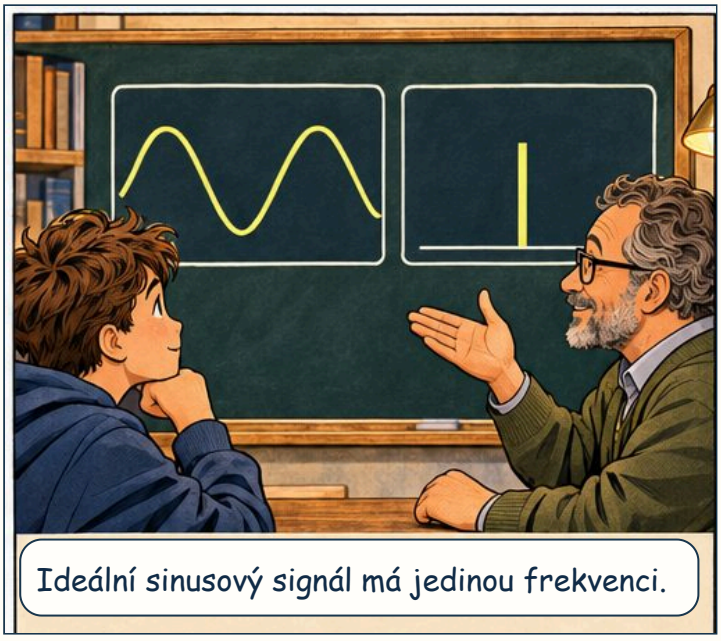
Časový průběh ukazuje, jak se signál mění.



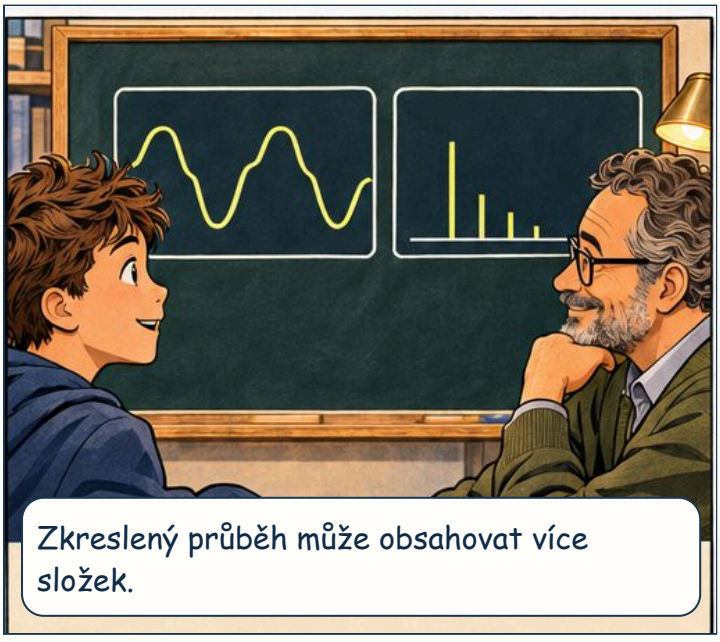
Spektrum zobrazuje jeho složky podle frekvence.



Oba pohledy popisují tentýž signál jinak.



Ideální sinusový signál má jedinou frekvenci.

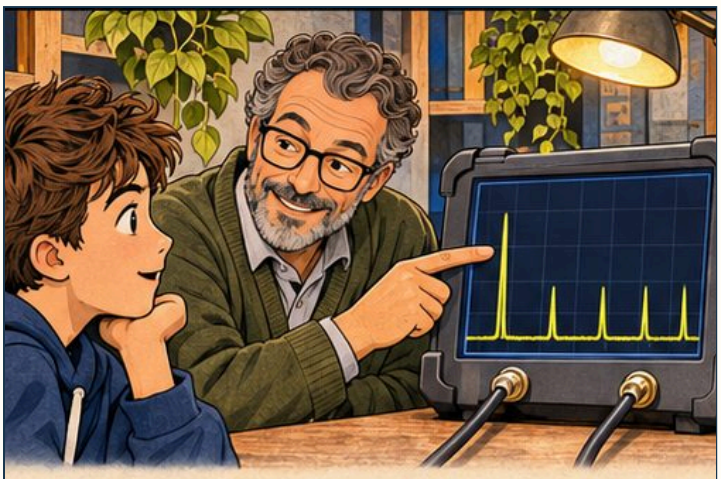


Zkreslený průběh může obsahovat více složek.



Mladík objevuje obraz, který dosud neuměl číst.

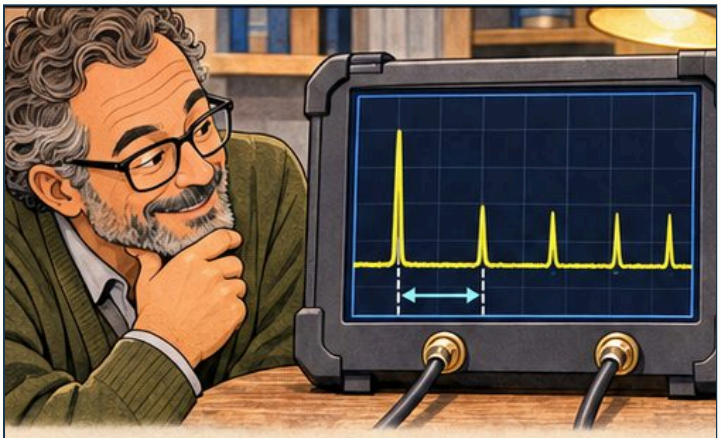
Harmonické se odhalují



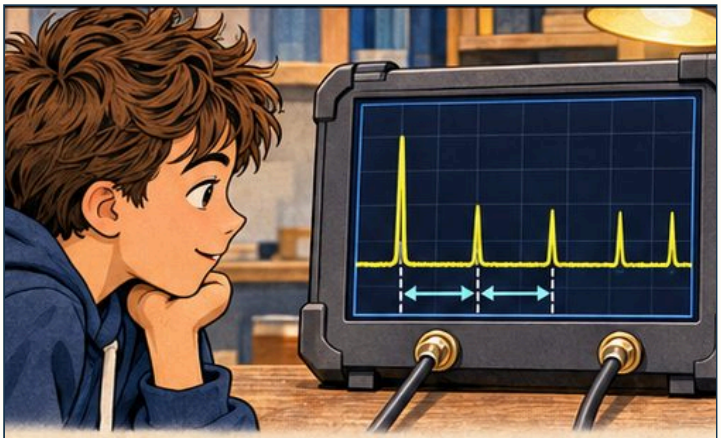
Základní frekvence je prvním vodítkem periodického signálu.



Jeho harmonické jsou celočíselnými násobky této frekvence.



Druhá harmonická má dvojnásobnou frekvenci.



Třetí harmonická má trojnásobnou frekvenci.

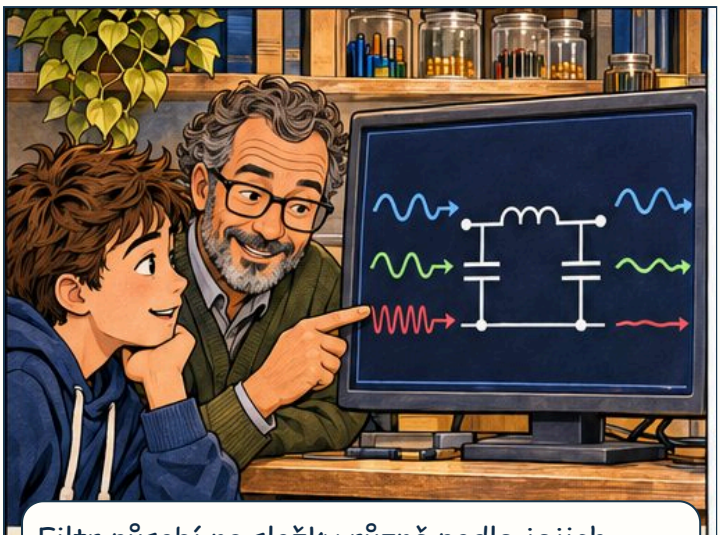


Ne všechny nežádoucí složky jsou ovšem harmonické.

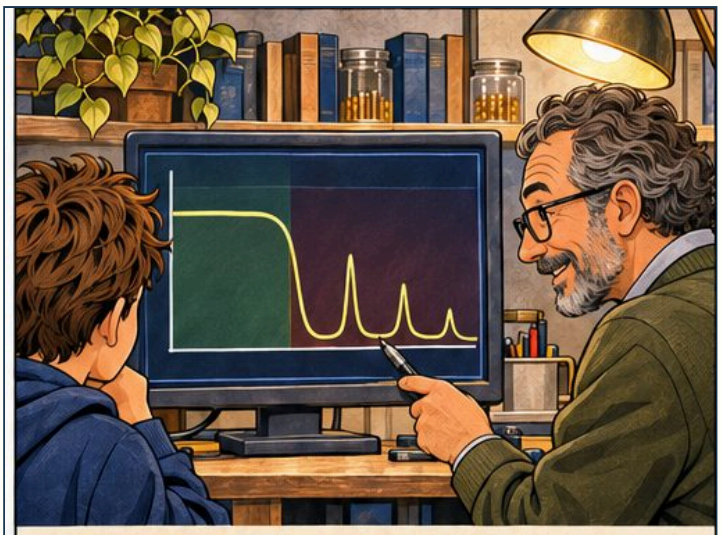


Filtr musí odpovídat přesně stanovenému požadavku.

Co chceme zachovat



Filtr působí na složky různě podle jejich frekvence.



Nejprve určíme užitečné a rušivé frekvence.



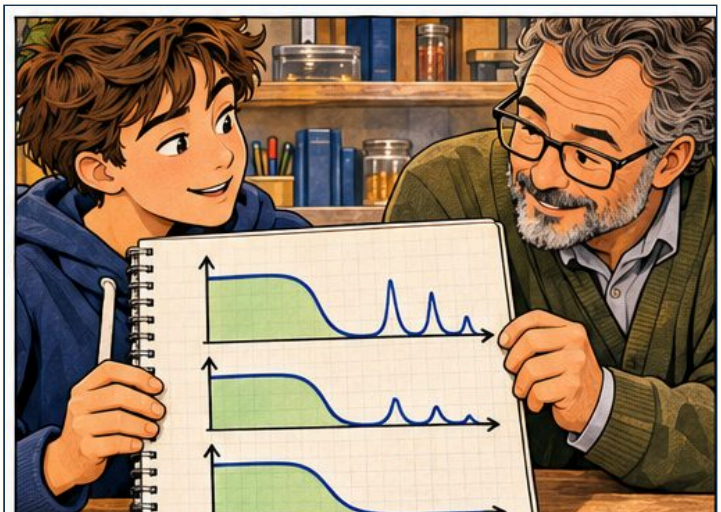
Stanovíme také požadované útlumy.



Bez těchto cílů by výpočet součástek neměl smysl.

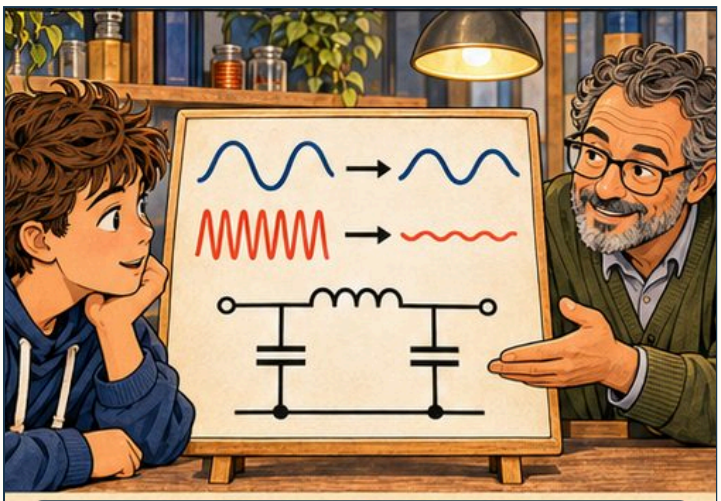


Mladík zakroužkuje užitečnou oblast ukázkového spektra.



Jeho zápisník se mění v zadání.

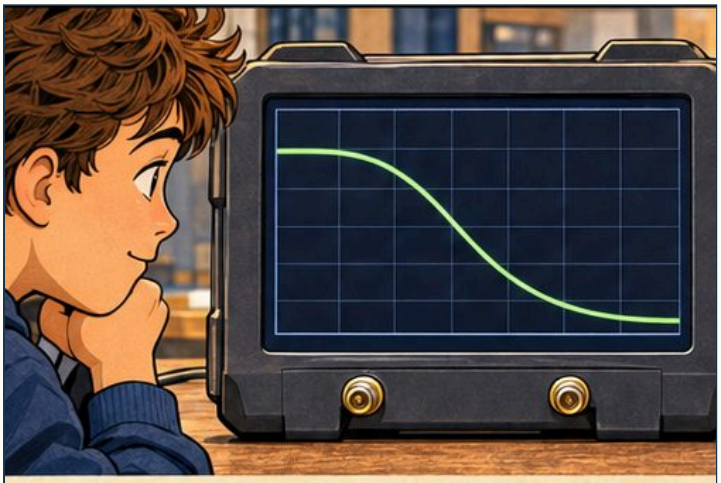
Volba dolní propusti



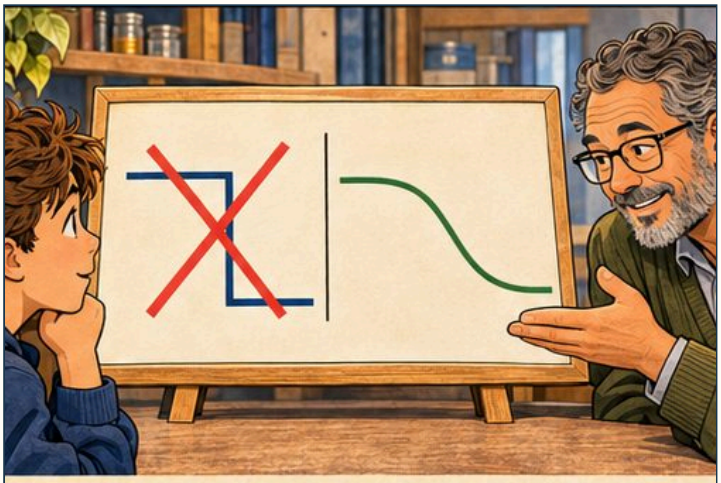
Dolní propust přenáší nízké frekvence lépe než vysoké.



Její propustné pásmo leží u nízkých frekvencí.



Výše útlum postupně roste.



Skutečný přechod nikdy není dokonale svislá stěna.



Tento typ se hodí pro dnešní ukázku.



Mladík kreslí svah místo bariéry.

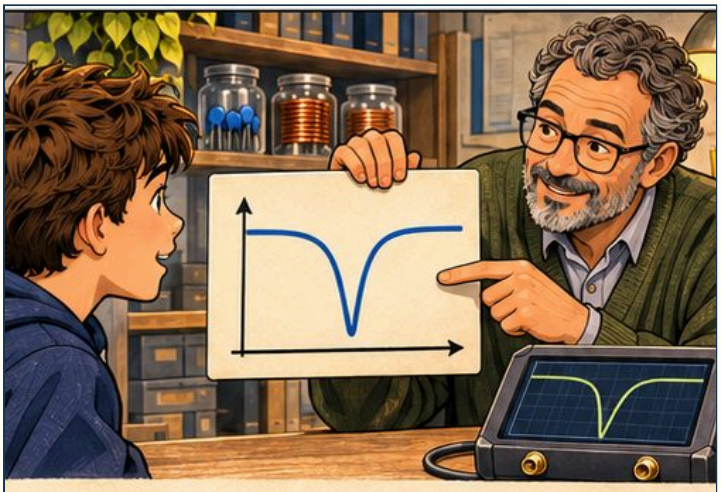
Jiné možnosti



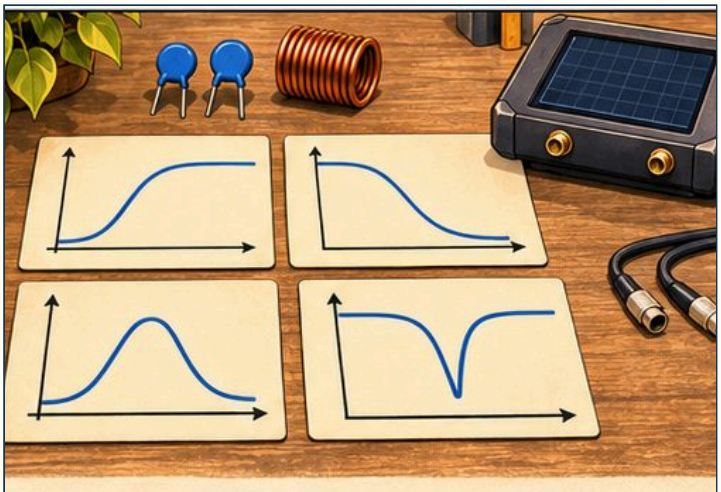
Horní propust potlačuje nízké frekvence a zachovává vysoké.



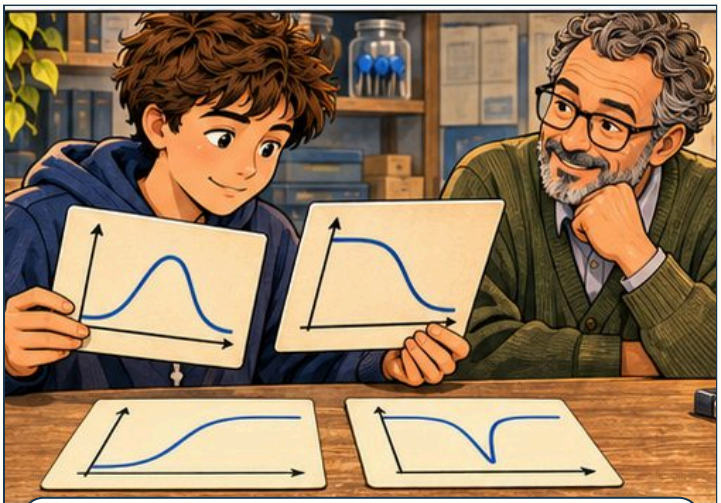
Pásmová propust upřednostňuje oblast mezi dvěma mezemi.



Pásmová zádrž naopak potlačuje zvolené pásmo.



Tyto rodiny neřeší stejný problém.



Jejich název popisuje odezvu, nikoli univerzální kvalitu.



Mladík ukládá tři kartičky pro další dílnu.

Mez, která stále propouští



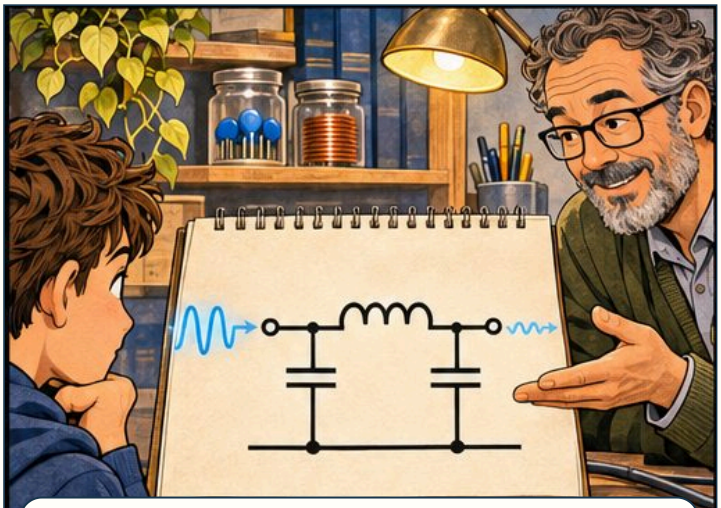
Mezní frekvence zde označuje referenční úroveň.



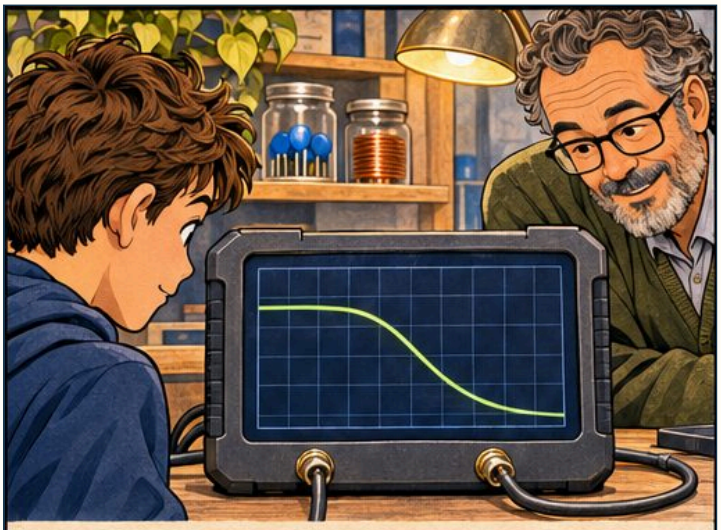
Neznamená náhlé zmizení signálu.



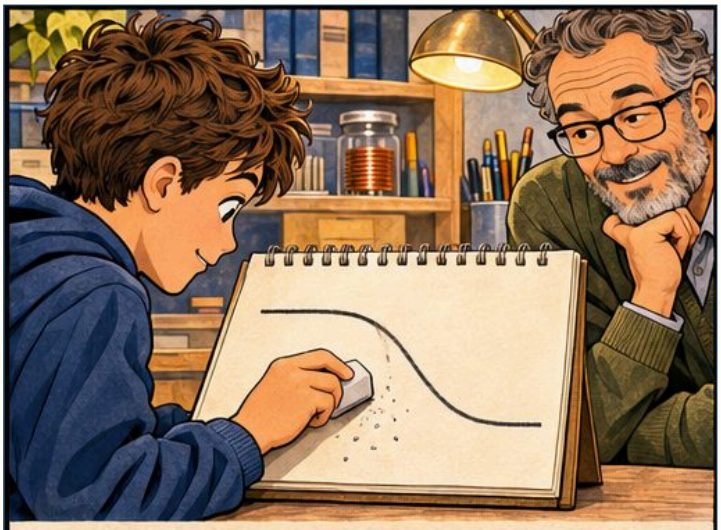
U ideálního Butterworthova filtru odpovídá přibližně −3 dB.



Filtr tedy při této frekvenci stále přenáší energii.



Nad ní útlum dále poroste.

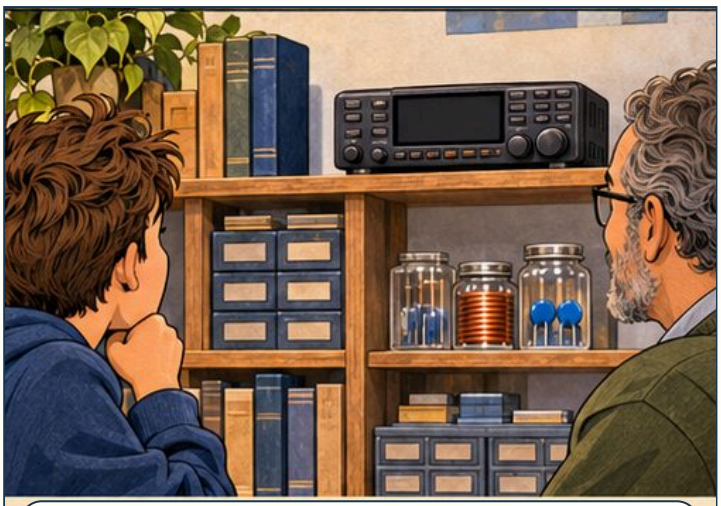


Toto upřesnění předchází prvnímu omylu.

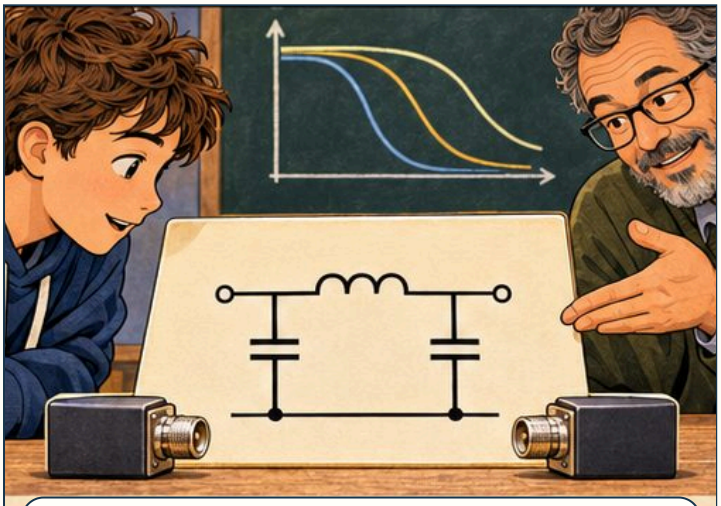
Laboratorní příklad



Volí teoretickou mezní frekvenci 10 MHz.



Hodnota slouží k učení, neurčuje vysílací frekvenci.



Referenční impedance zdroje i zátěže bude 50 Ω.



Obvod budou zkoumat na stole slabým signálem.



Nepřipojí anténu ani vysílač.

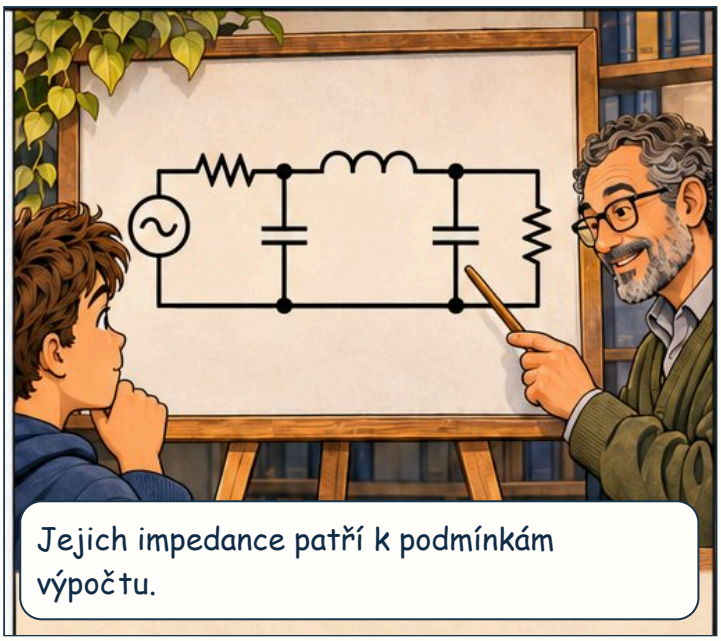


Cílem je měřitelná odezva, nikoli rádiové spojení.

Proč uvádět 50 ohmů?



Filtr pracuje mezi zdrojem a zátěží.



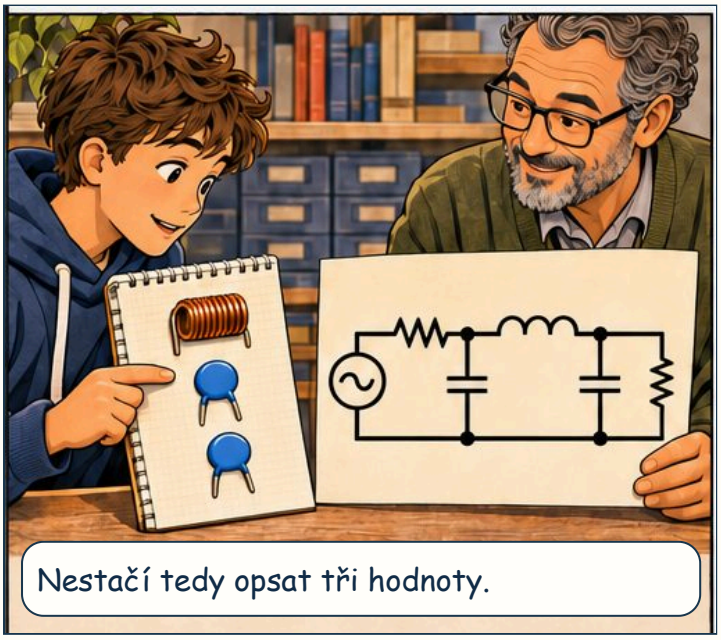
Jejich impedance patří k podmínkám výpočtu.



Zde má každá ideálně odporovou hodnotu 50 Ω.



Změna těchto podmínek mění výslednou odezvu.



Nestačí tedy opsat tři hodnoty.



Mladík dokresluje do schématu obě zakončení.

Model a skutečný obvod



Výpočet začne ideálními bezeztrátovými součástkami.



Skutečný obvod má odpory i parazitní jevy.



Model umožňuje předpovědět první odezvu.



Měření pak pomůže zkoumat rozdíly.

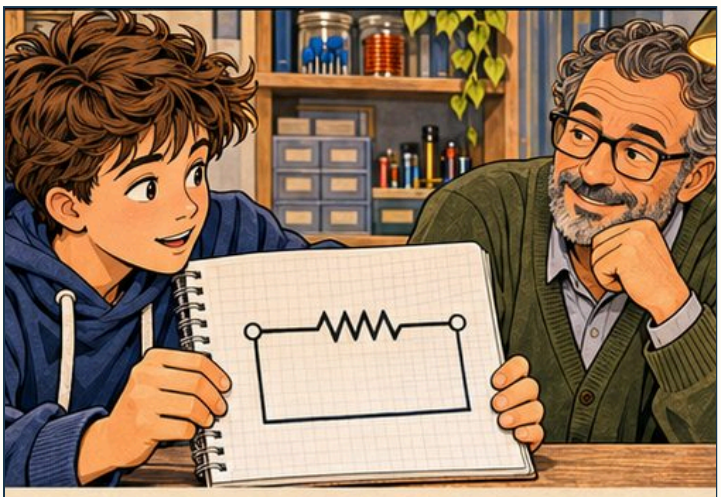


Záměna předpovědi a výsledku brání pochopení odchylek.

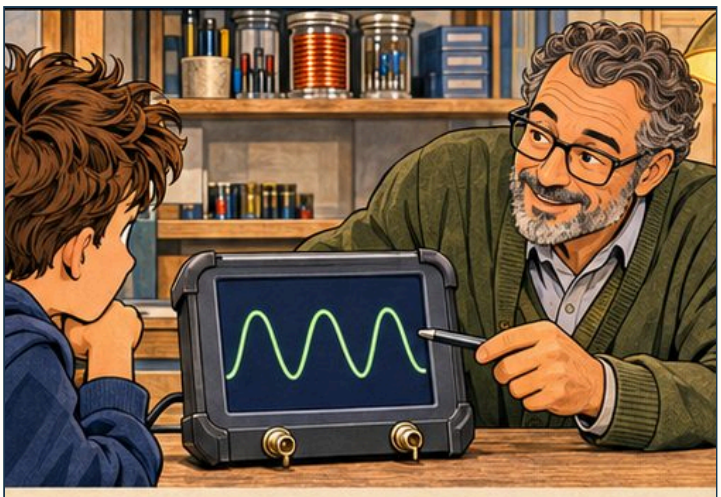


Zápisník pro každé vyhrazuje zvláštní místo.

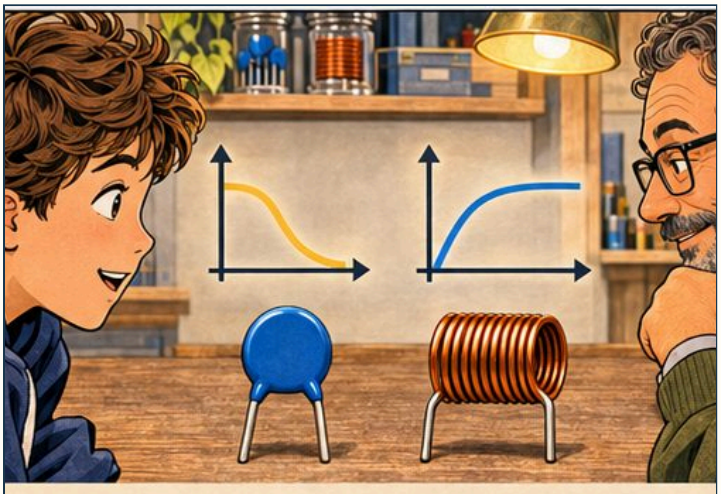
Samotný odpor už nestačí



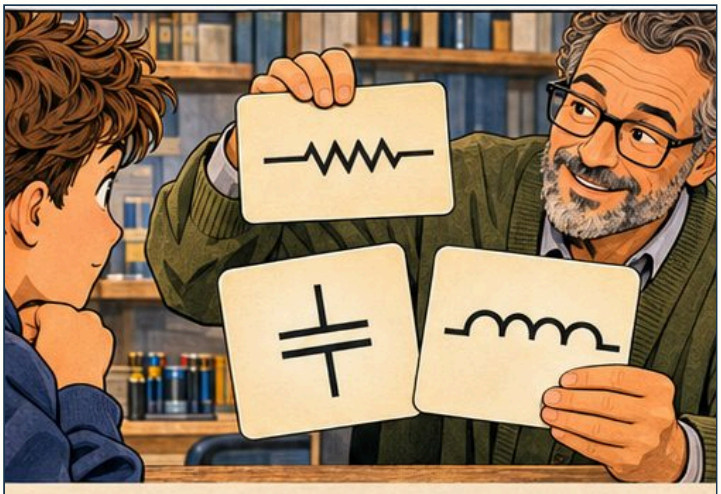
Předchozí díl spojoval napětí, proud a odpor při stejnosměrném proudu.



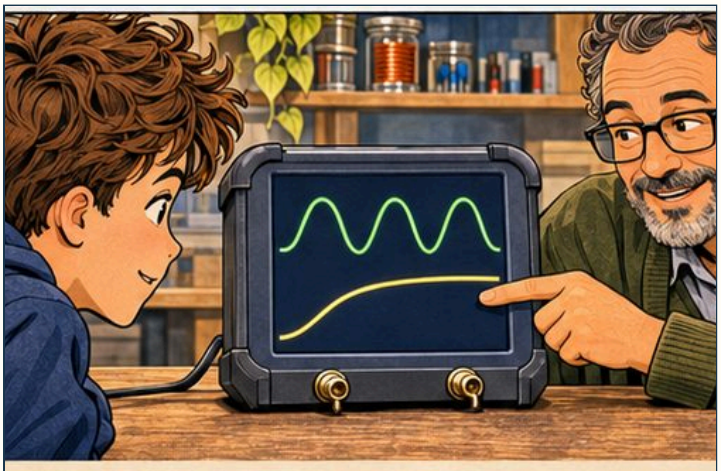
Zde se signál rychle mění a záleží na frekvenci.



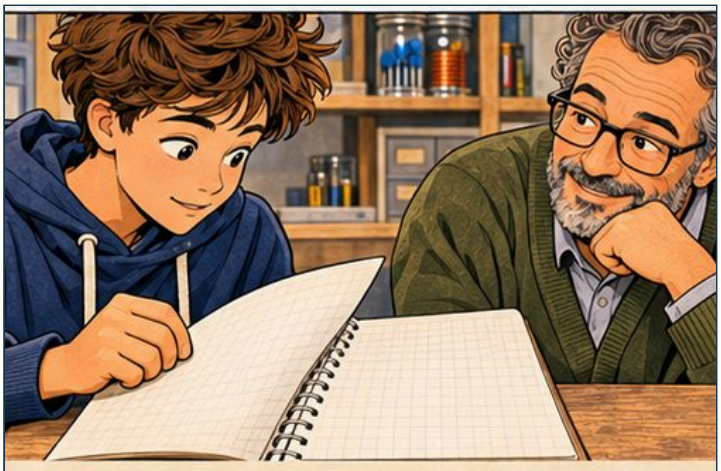
Kondenzátory a cívky kladou frekvenčně závislou reaktanci.



Tato reaktance není obyčejný odpor.



Impedance obecněji popisuje elektrické chování při střídavém proudu.

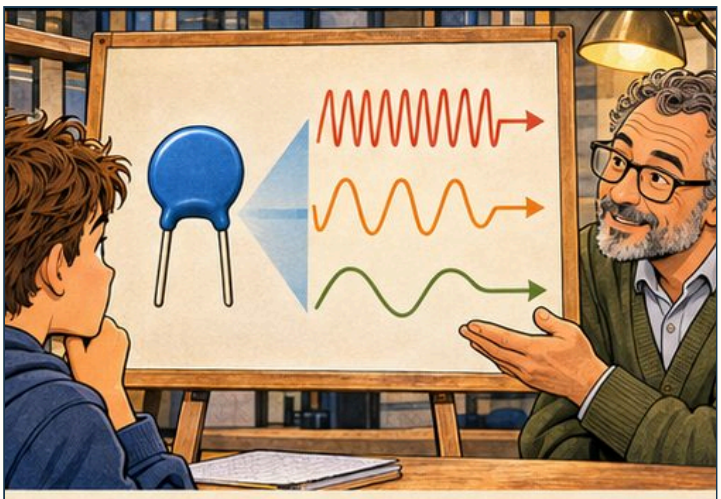


Mladík chápe, proč potřebuje nový model.

Úloha kondenzátoru



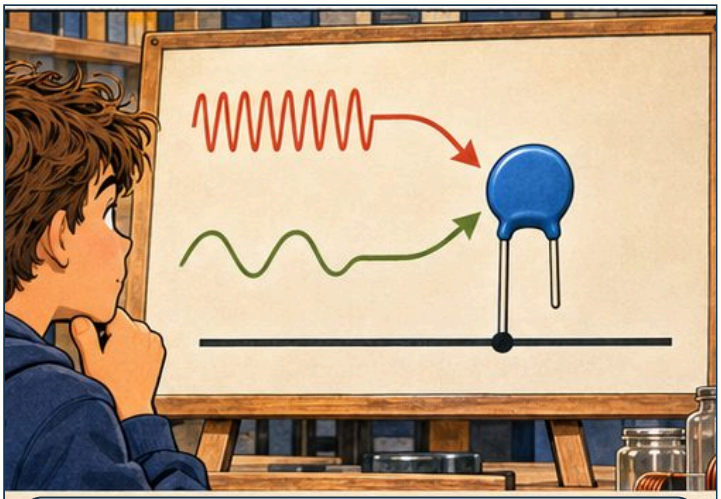
Kapacita se značí C a udává ve faradech F.



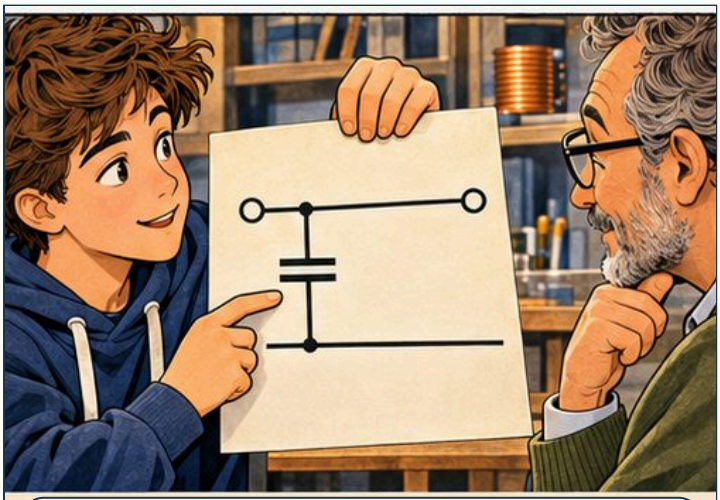
U ideálního kondenzátoru reaktance s rostoucí frekvencí klesá.



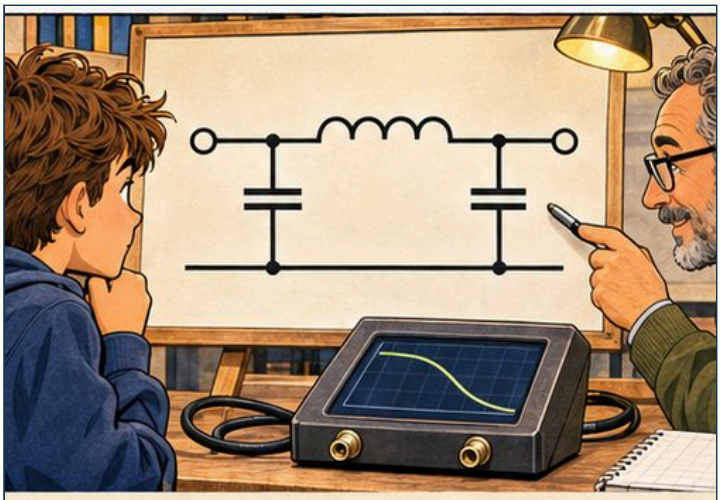
Její velikost je Xc = 1/(2πfC).



Při stejné kapacitě mají vyšší frekvence menší reaktanci.



V jejich filtru budou kondenzátory připojeny ke společné zemi.

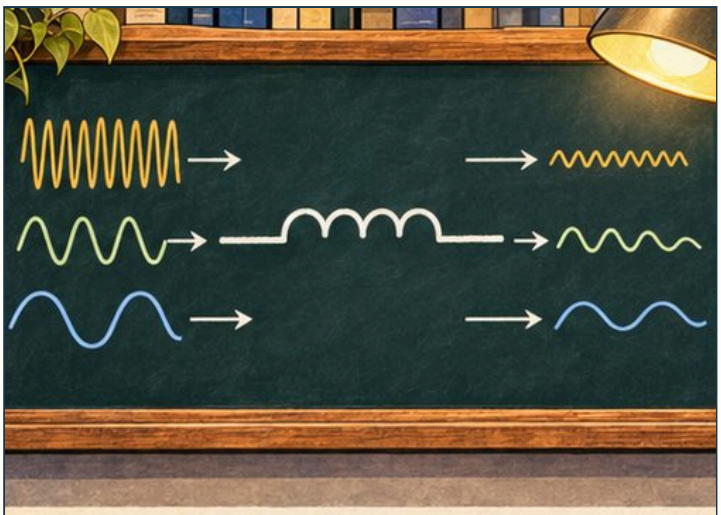


Jejich úloha závisí také na zbytku obvodu.

Úloha cívky



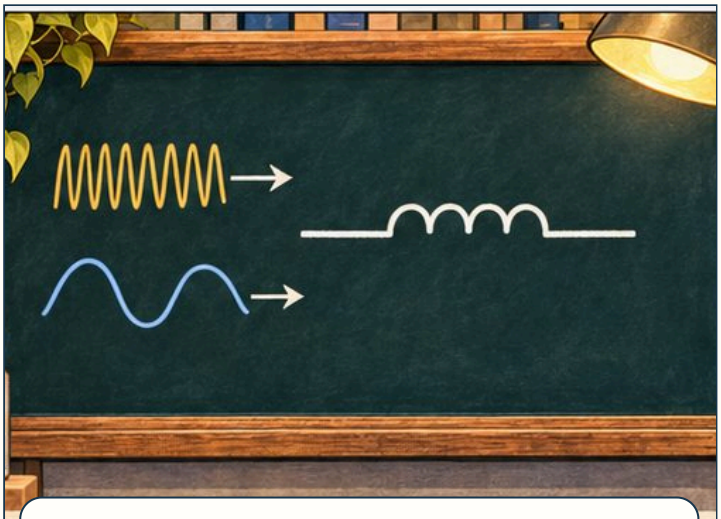
Indukčnost se značí L a udává v henry H.



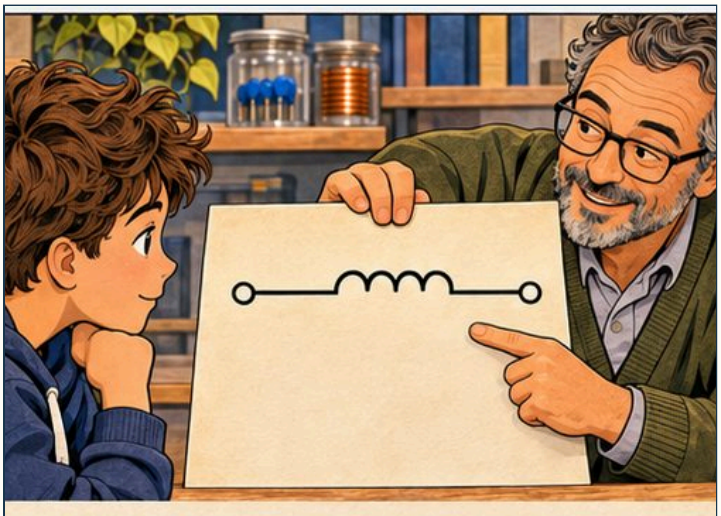
U ideální cívky reaktance s frekvencí roste.



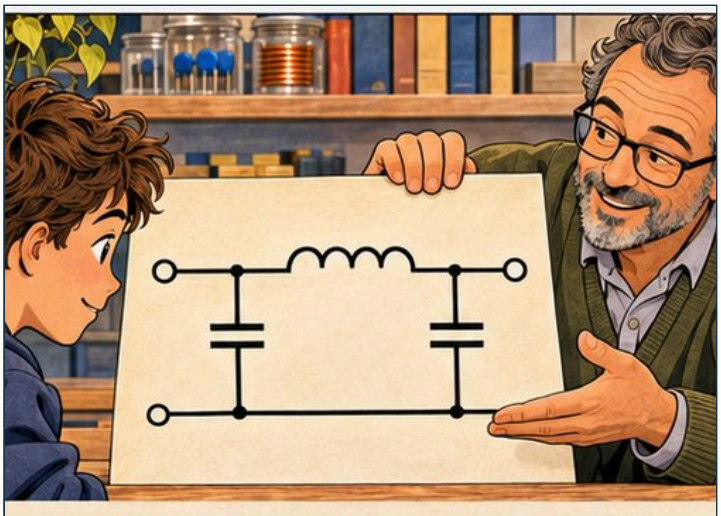
Její velikost je XL = 2πfL.



Při stejné indukčnosti mají vyšší frekvence větší reaktanci.

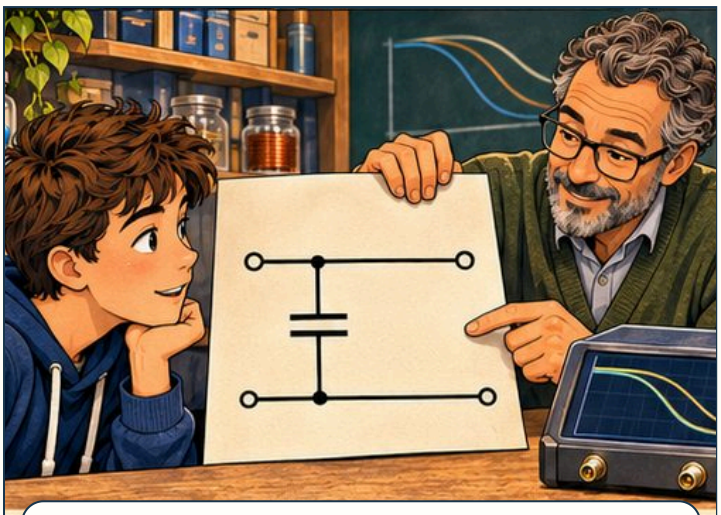


V jejich filtru bude cívka v cestě signálu.

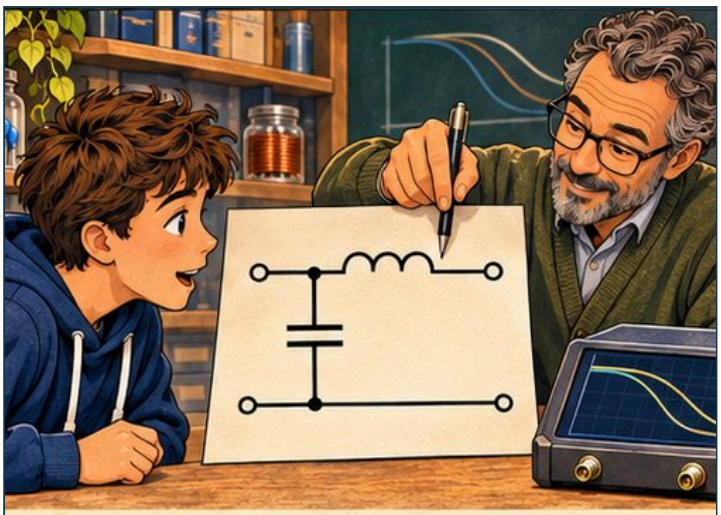


Oba typy součástek budou působit společně.

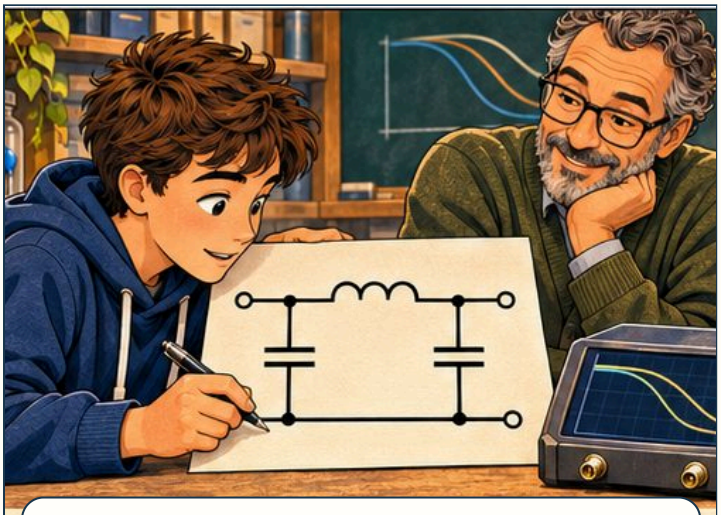
Schéma získává tvar π



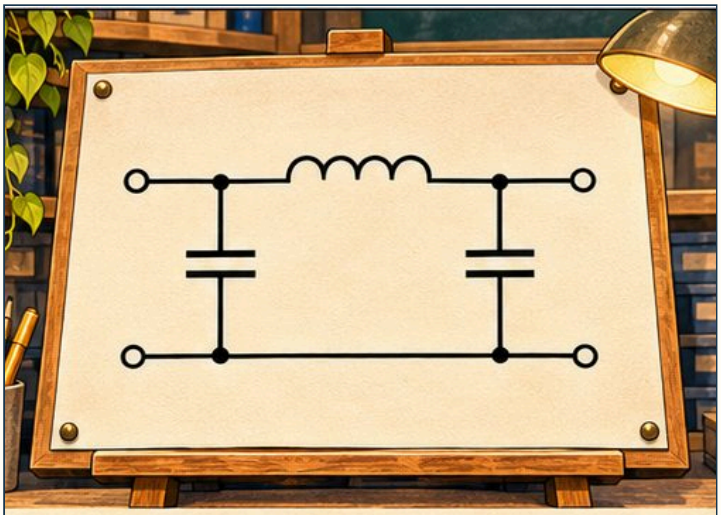
Vstup spojuje první kondenzátor se společnou zemí.



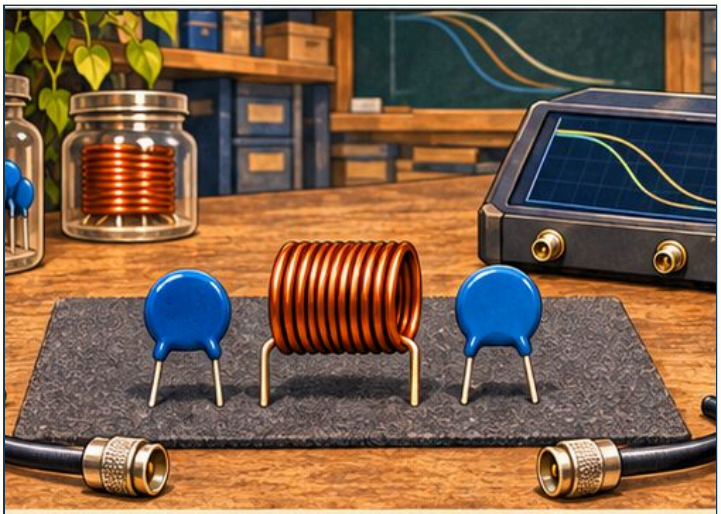
Cívka pak sériově propojuje vstup a výstup.



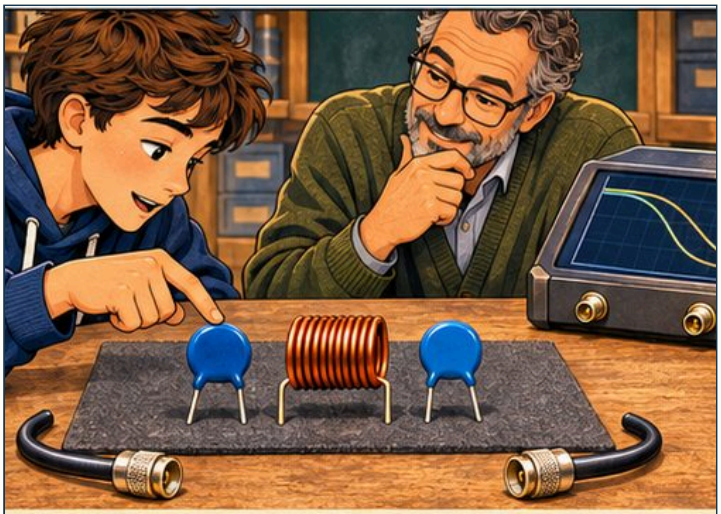
Druhý kondenzátor spojuje výstup s toutéž zemí.



Po stranách cívky sestupují dvě větve.

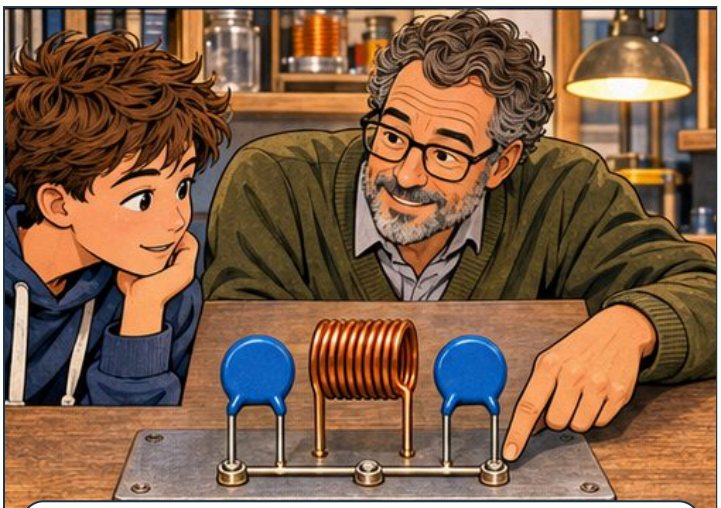


Toto uspořádání připomíná řecké písmeno π.

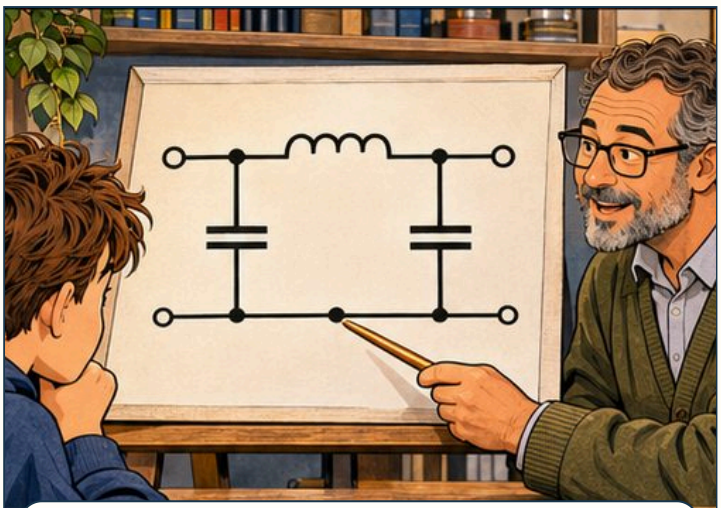


Mladík sleduje tužkou každé propojení.

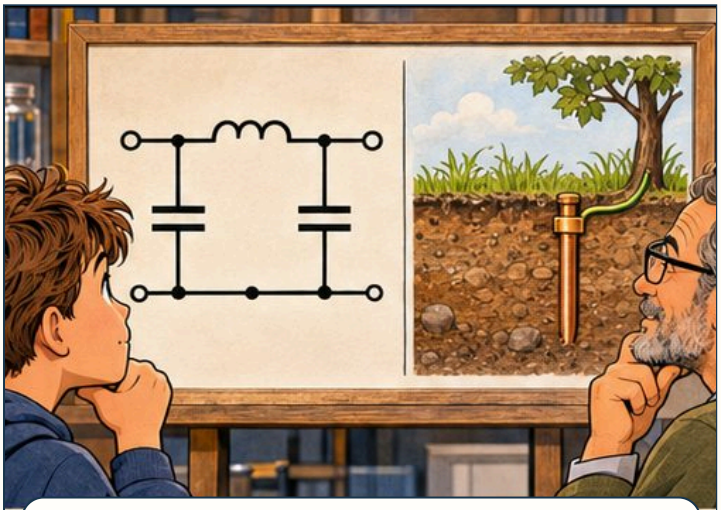
Zem ve schématu



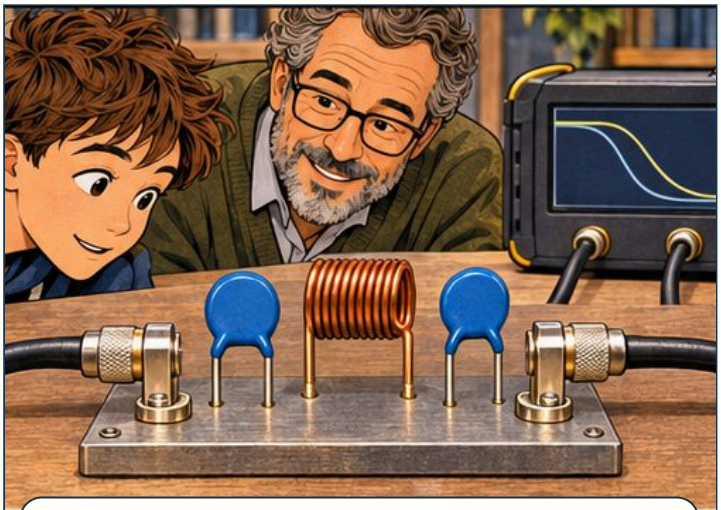
Oba kondenzátory sdílejí společný elektrický referenční bod.



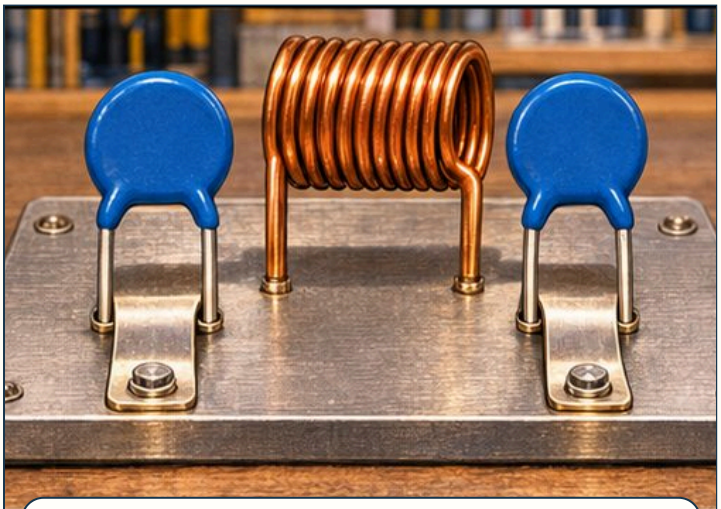
Značka země zde představuje tuto referenci obvodu.



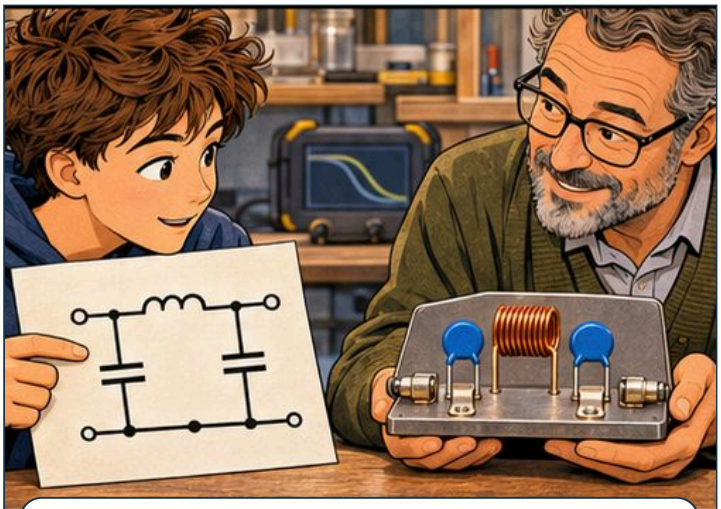
Nemusí automaticky znamenat spojení s ochranným uzemněním.



Stínění koaxiálních kabelů se připojí k této zemi podle návrhu.



Krátké propojení omezuje některé parazitní jevy.



Mladík rozlišuje značku a její konkrétní provedení.

Tři prvky, jeden řád



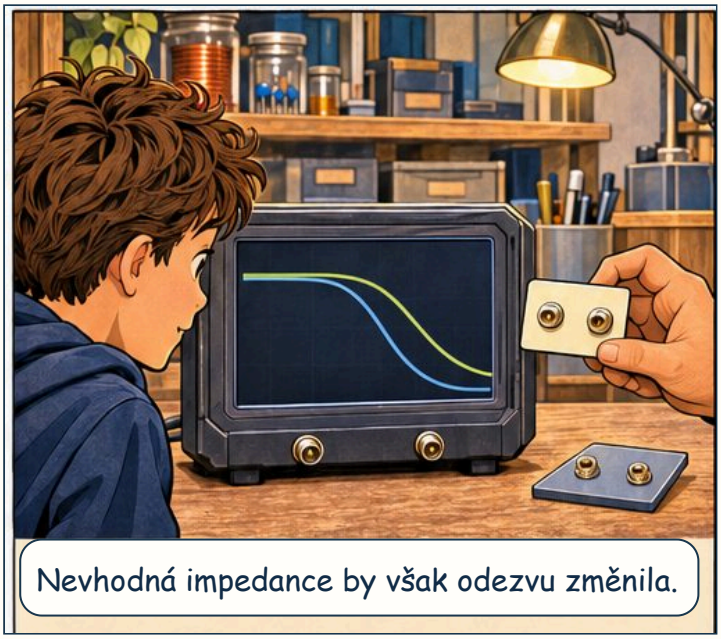
Tato ideální síť má tři reaktanční prvky: C, L a C.



Zde vytvářejí dolní propust třetího řádu.



Řád charakterizuje mimo jiné vzdálený sklon modelu.



Nevhodná impedance by však odezvu změnila.



Náhodné přidávání součástek požadovaný filtr nevytvoří.

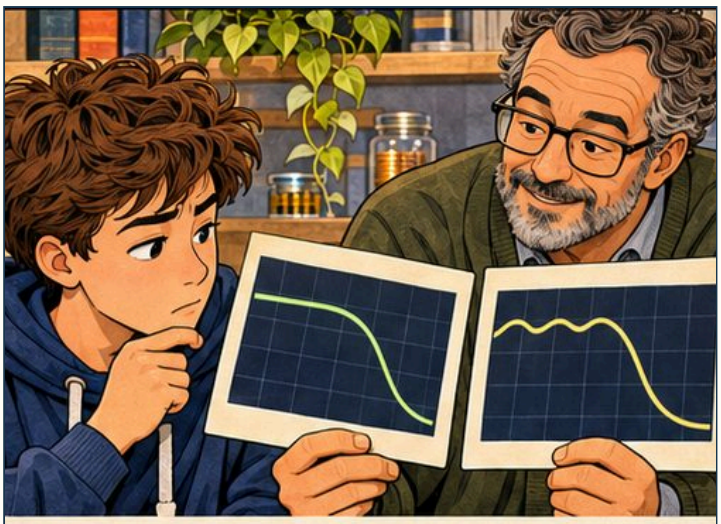


Výpočet musí odpovídat podobě schématu.

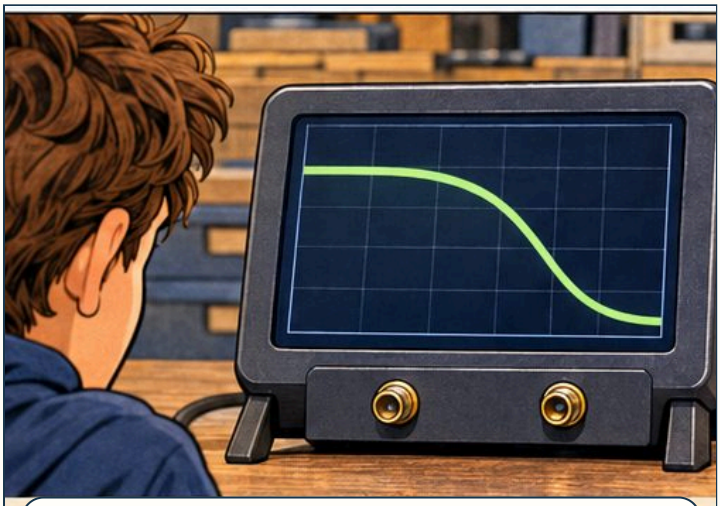
Proč Butterworth?



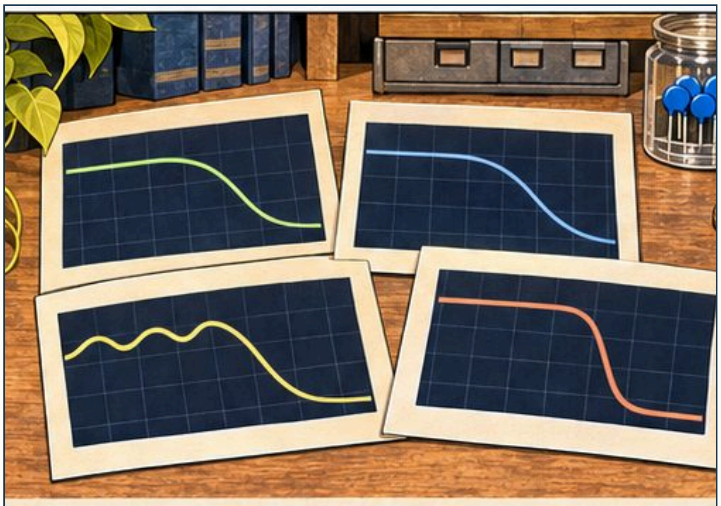
Butterworthova odezva je v propustném pásmu maximálně plochá.



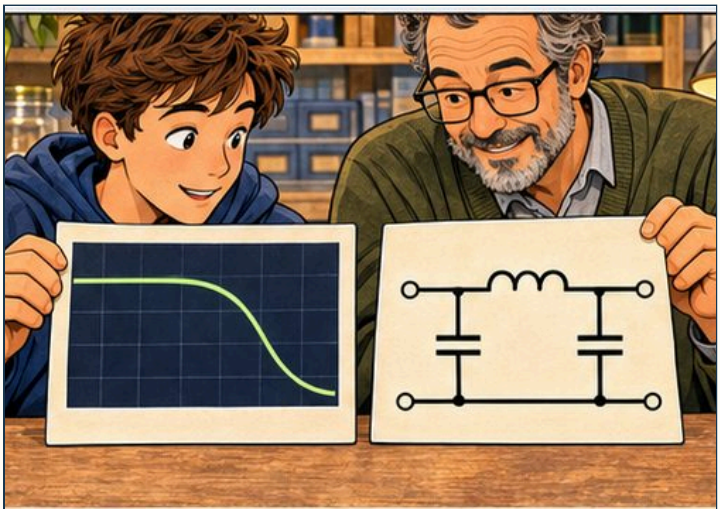
Ideální model v tomto pásmu nemá zvlnění.



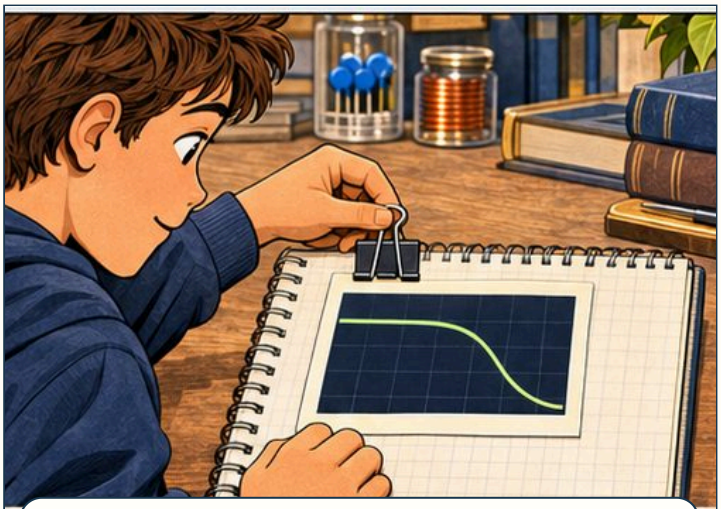
Přechod zůstává pozvolný, s charakteristickým zakřivením.



Jiné odezvy přijímají jiné kompromisy.

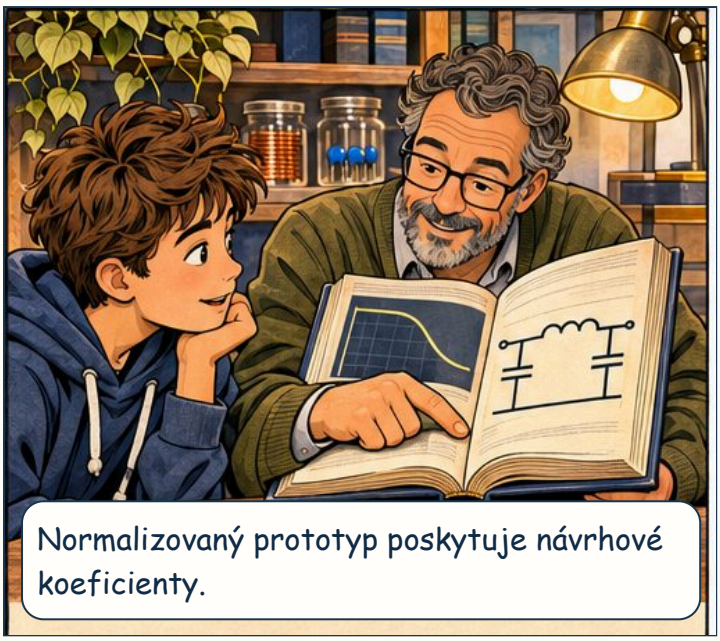


Pro první přehledný návrh volí tuto rodinu.



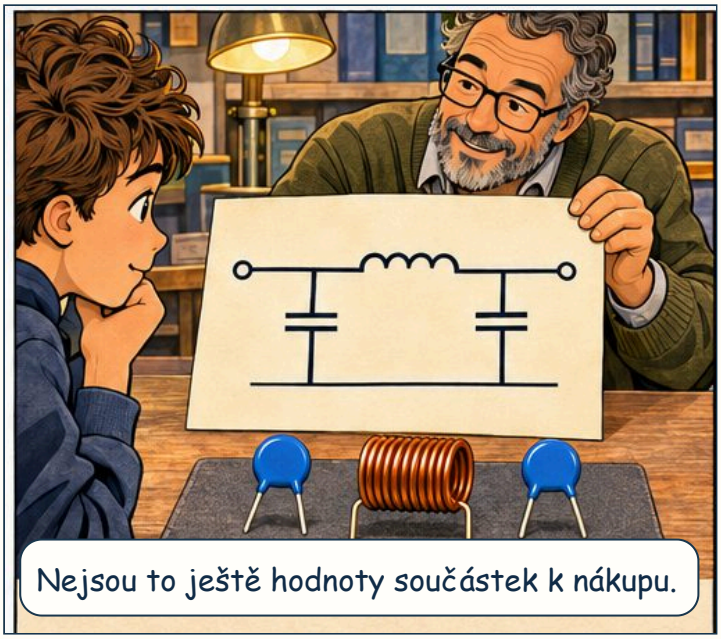
Název tedy říká více než samotná dolní propust.

Začít prototypem





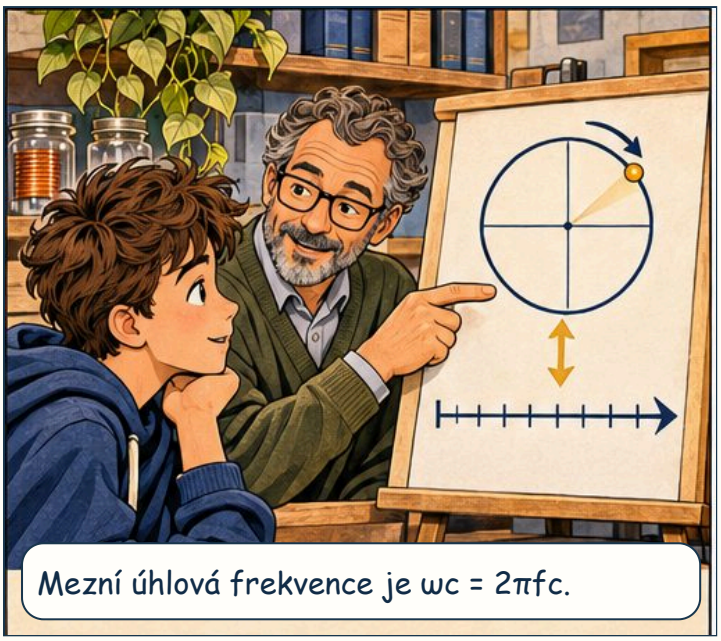








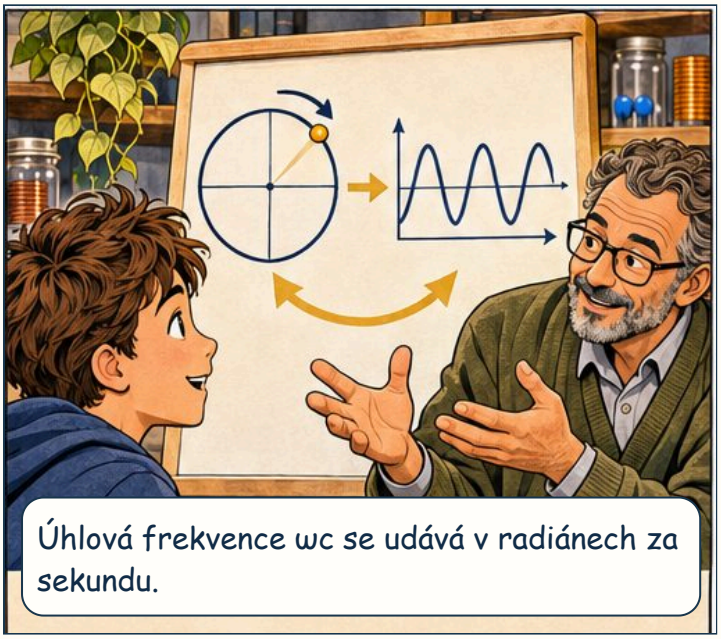
Změna měřítka



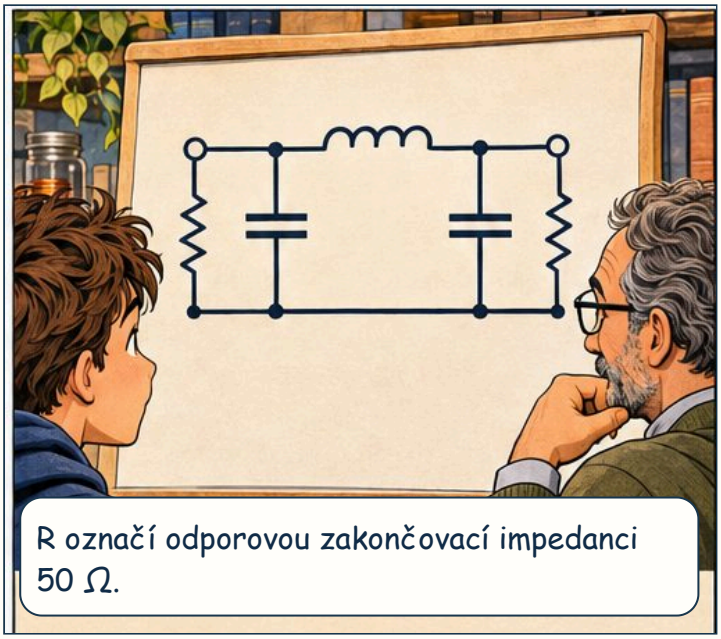
Mezní úhlová frekvence je ωc = 2πfc.



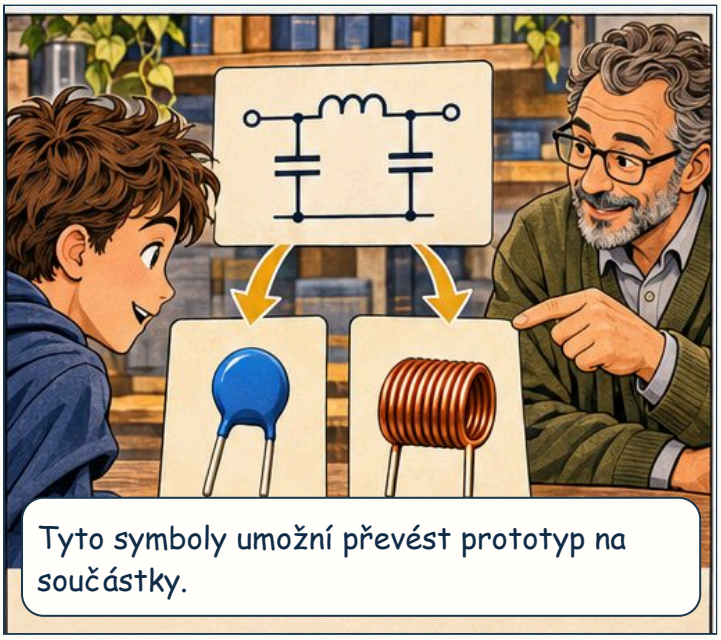
Symbol fc zde označuje mezní frekvenci v hertzech.



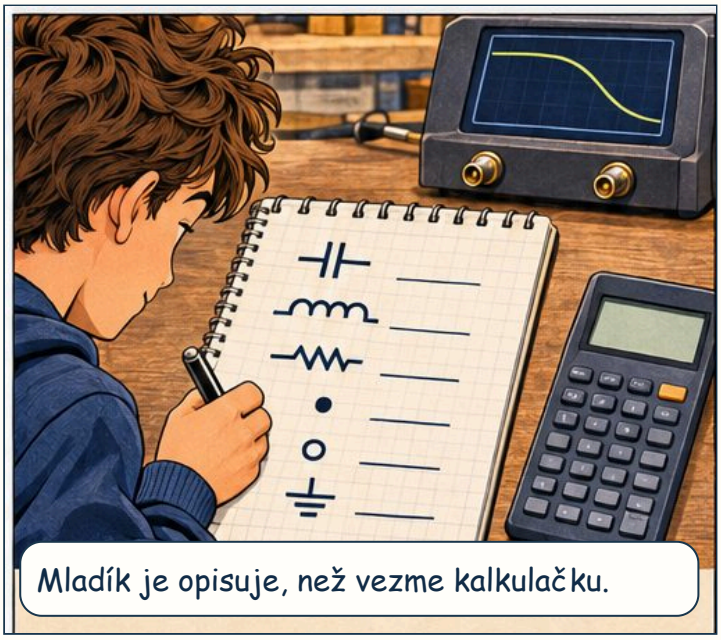
Úhlová frekvence ωc se udává v radiánech za sekundu.



R označí odporovou zakončovací impedanci 50 Ω.



Tyto symboly umožní převést prototyp na součástky.

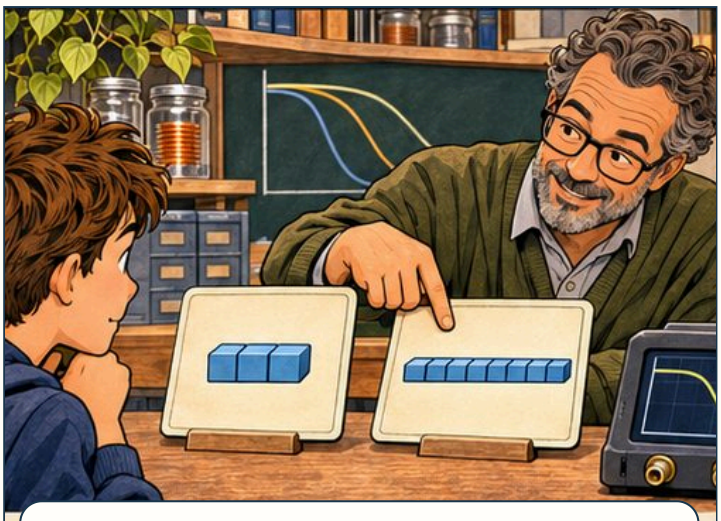


Mladík je opisuje, než vezme kalkulačku.

Jednotky před čísly



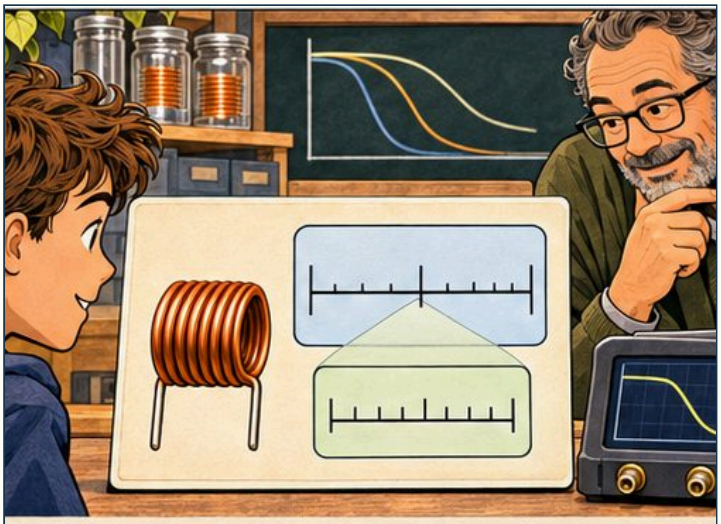
Jeden megahertz je milion hertzů.



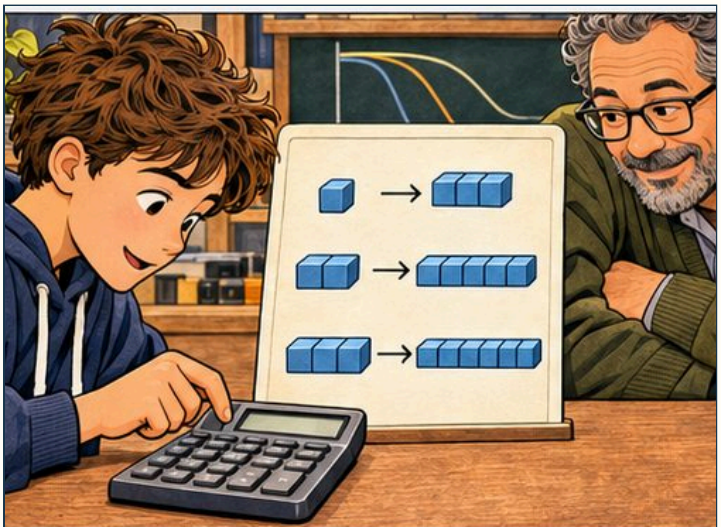
Jejich mez 10 MHz tedy znamená 10 000 000 Hz.



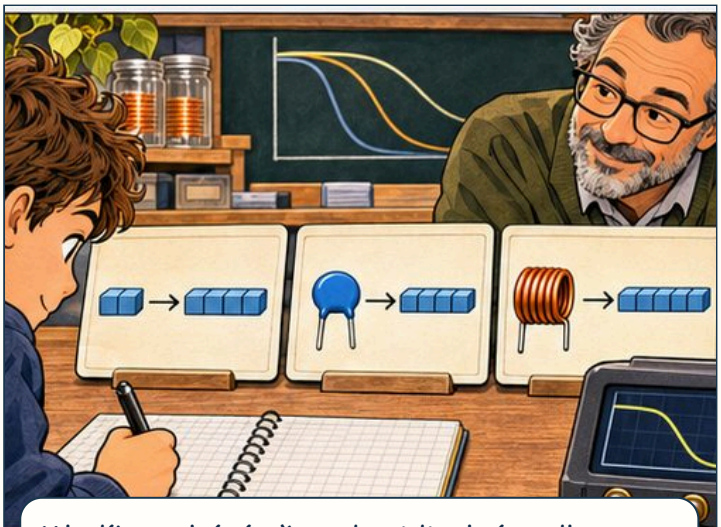
Jeden pikofarad je 10^{-12} F.



Jeden mikrohenry je 10^{-6} H.

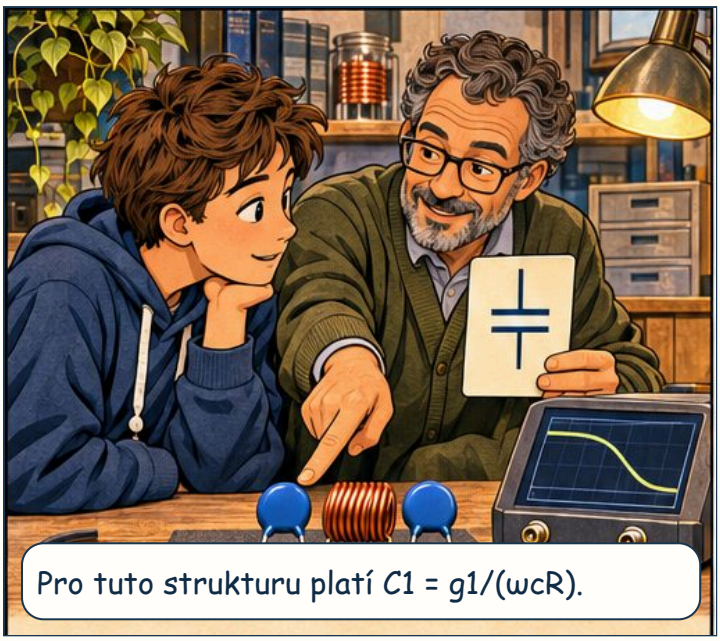


Vzorce nejprve použijí základní jednotky.

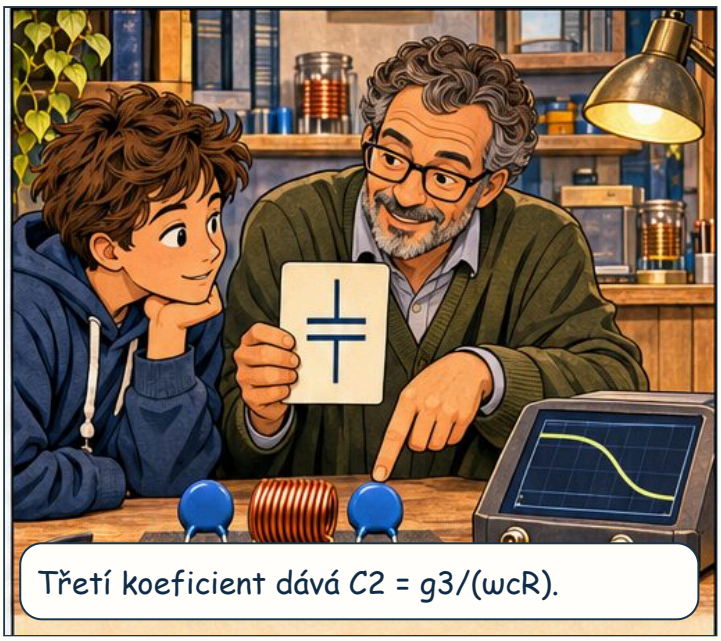


Mladík nechává převody viditelné vedle výpočtů.

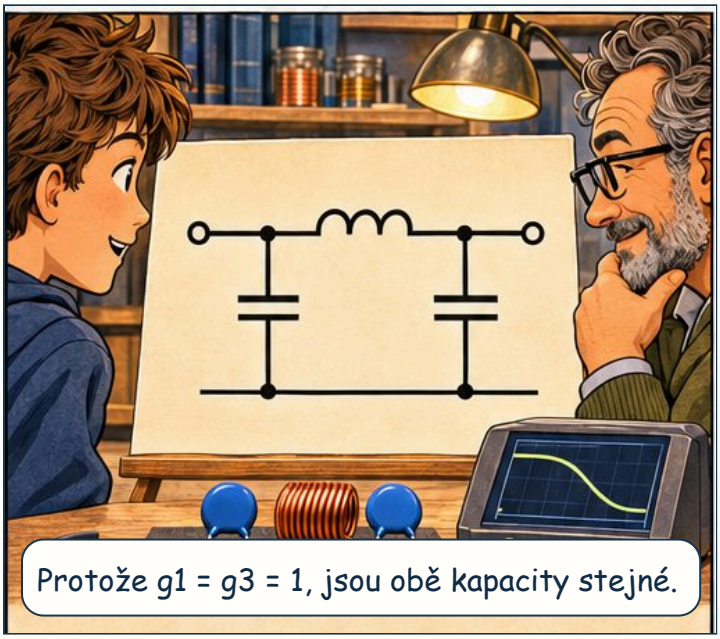
Vzorec pro kondenzátory



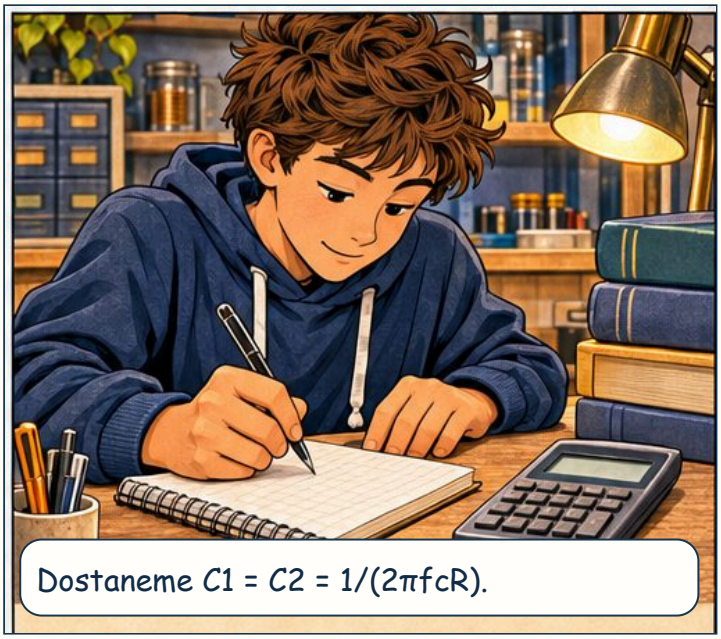
Pro tuto strukturu platí C1 = g1/(ωcR).



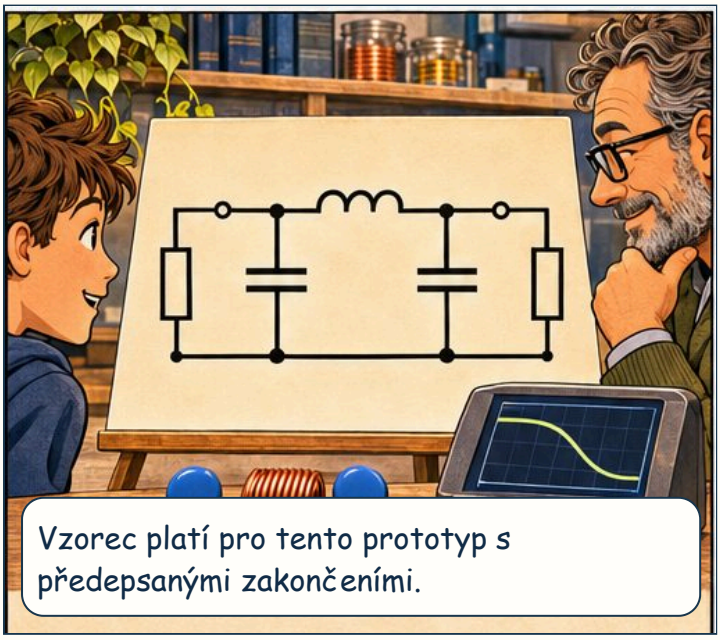
Třetí koeficient dává C2 = g3/(ωcR).



Protože g1 = g3 = 1, jsou obě kapacity stejné.



Dostaneme C1 = C2 = 1/(2πfcR).



Vzorec platí pro tento prototyp s předepsanými zakončeními.



Mladík před dosazením kontroluje každý symbol.

Výpočet kapacit



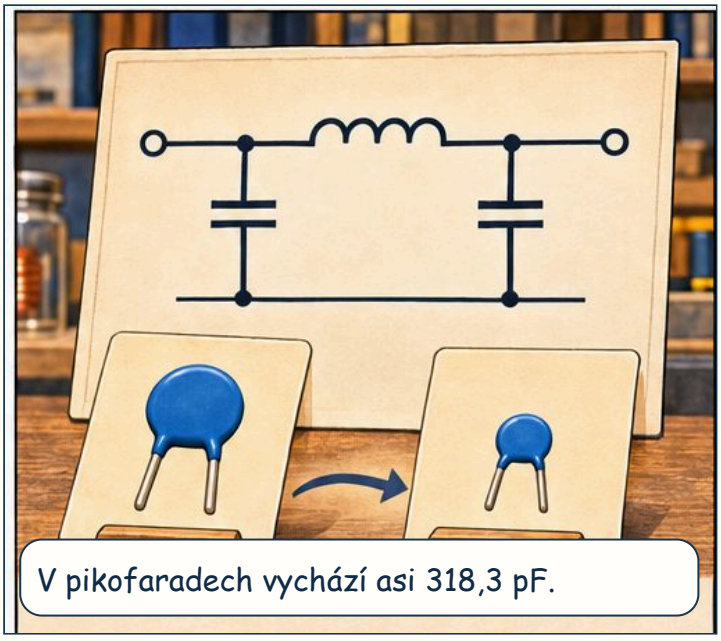
Dosadí fc = 10 000 000 Hz a R = 50 Ω.



Jmenovatel je přibližně 3,142 × 10⁹.



Každá ideální kapacita je přibližně 3,183 × 10⁻¹⁰ F.



V pikofaradech vychází asi 318,3 pF.

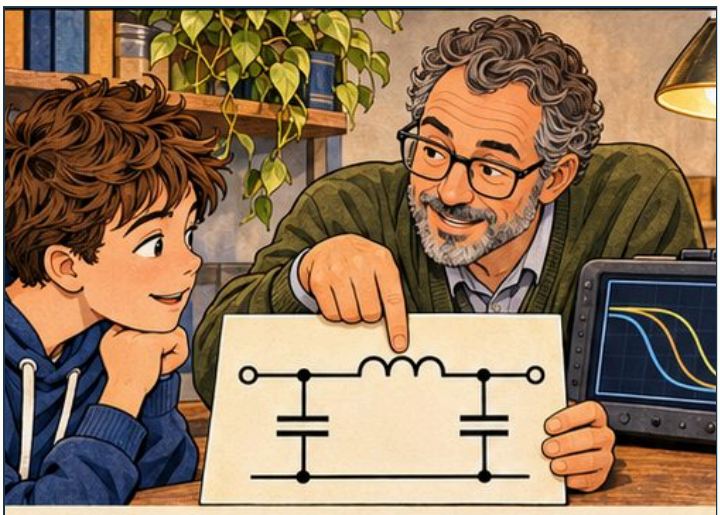


Oba kondenzátory tedy mají stejnou teoretickou hodnotu.



Lucas zapisuje výsledek i s jednotkou.

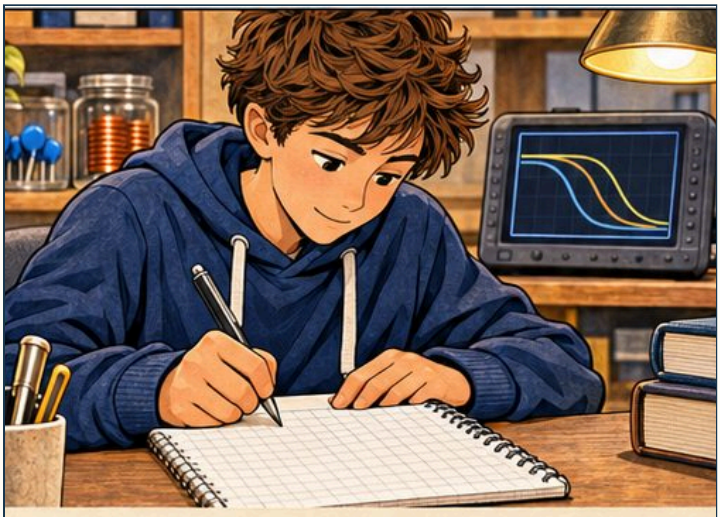
Vzorec pro cívku



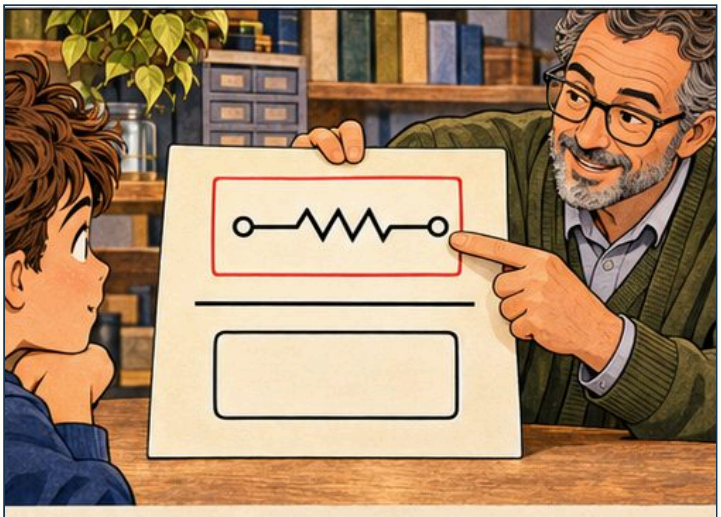
Pro sériovou cívku platí L = g2R/ωc.



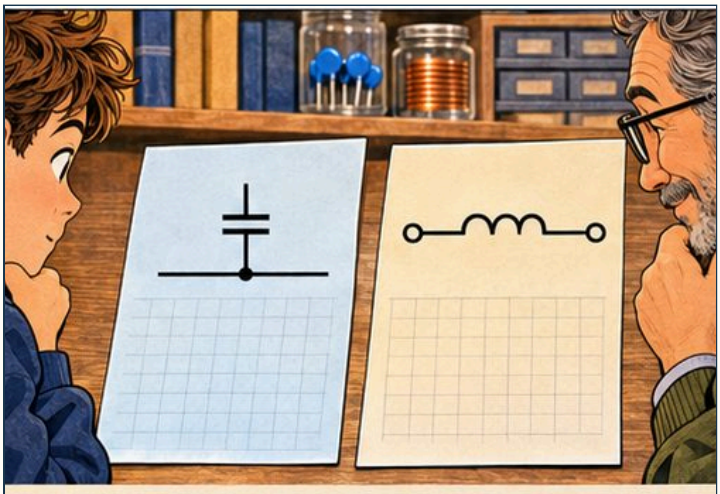
Prostřední koeficient je zde g2 = 2.



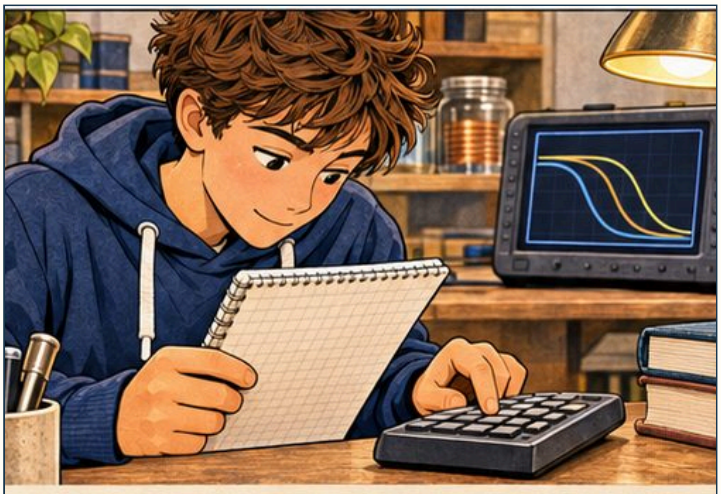
Dostaneme tedy L = 2R/(2πfc).



Zakončovací odpor je tentokrát v čitateli.

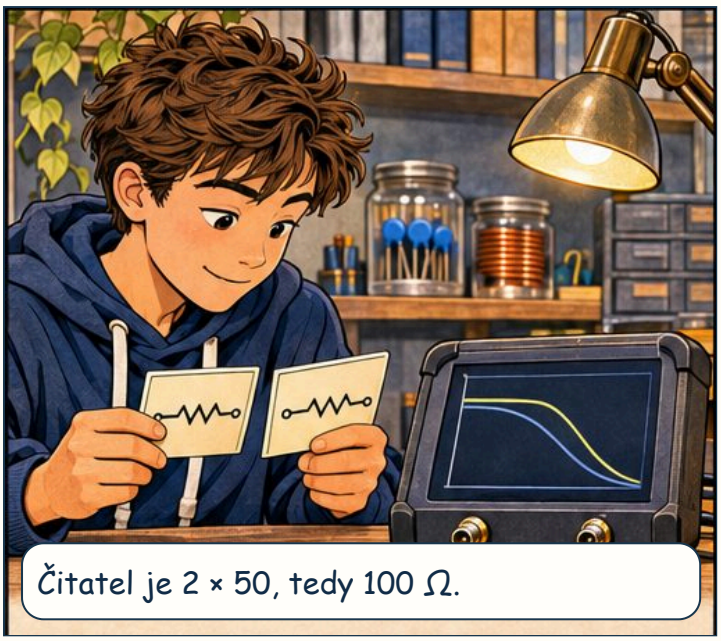


Mladík porovnává tento vzorec se vzorcem pro kondenzátory.

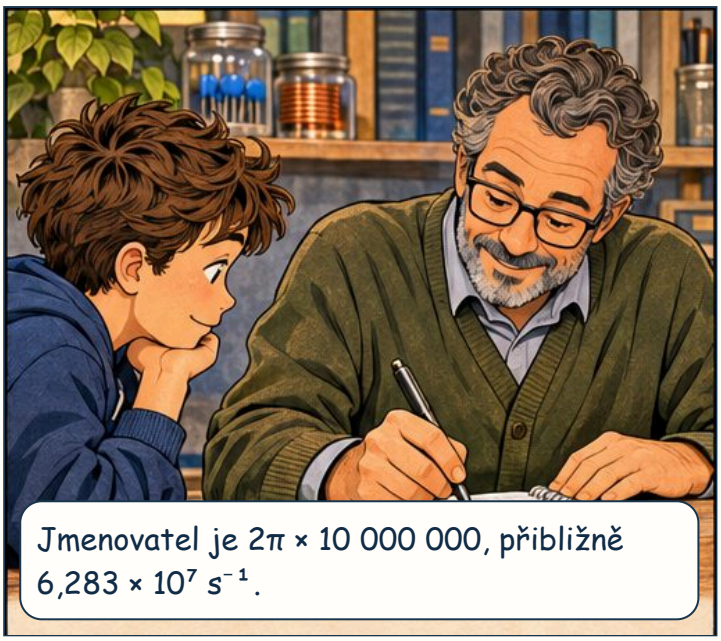


Vizuální podobnost nenahrazuje pozorné čtení.

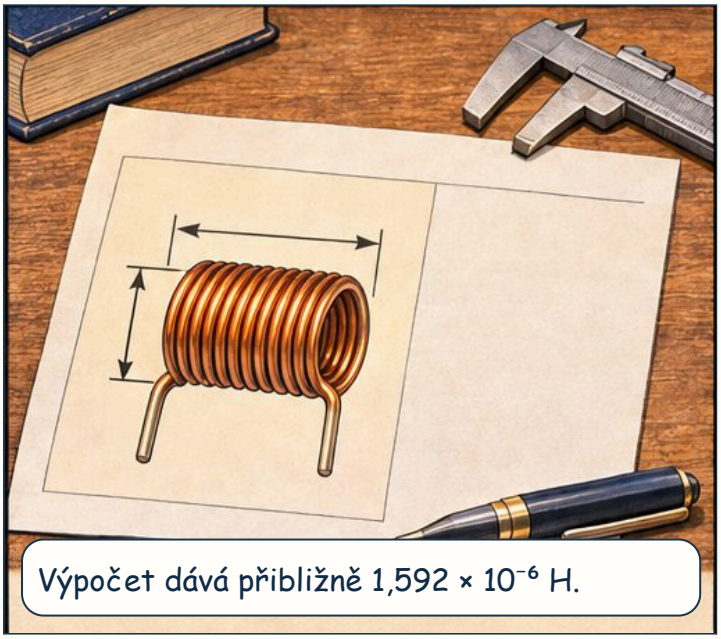
Výpočet indukčnosti



Čitatel je 2 × 50, tedy 100 Ω.



Jmenovatel je 2π × 10 000 000, přibližně $6{,}283 \times 10^{7}\ s^{-1}$.



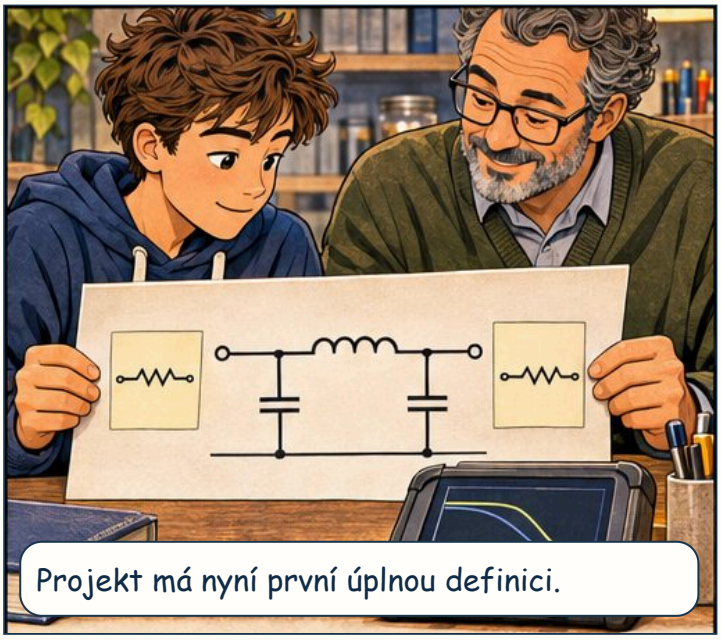
Výpočet dává přibližně $1{,}592 \times 10^{-6}$ H.



Ideální cívka tedy bude mít asi 1,59 μH.



Všechny tři výsledky doplní do stejného schématu.



Projekt má nyní první úplnou definici.

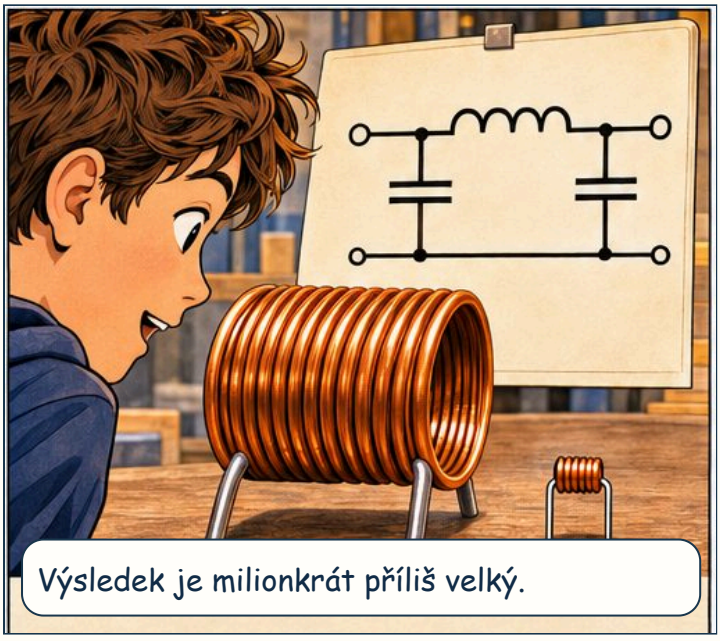
Milionová chyba



Mladík zkouší výpočet rychle zadat znovu.



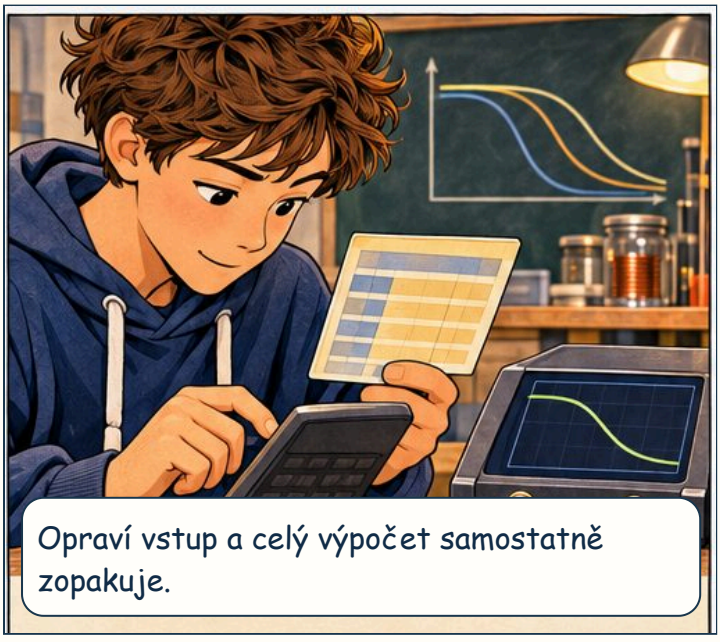
Zadá 10 místo 10 000 000.



Výsledek je milionkrát příliš velký.



Srovnání s očekávanými součástkami problém ihned odhalí.



Opraví vstup a celý výpočet samostatně zopakuje.

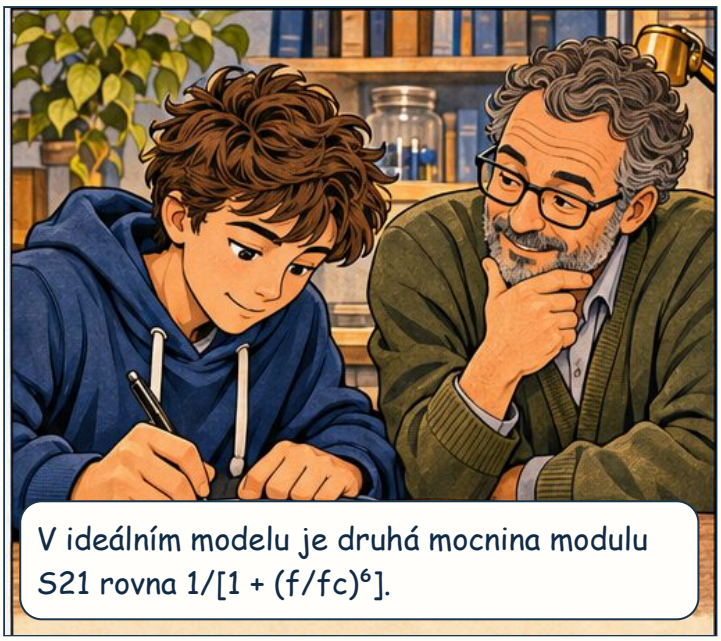


Kontrola řádu velikosti se stává užitečným zvykem.

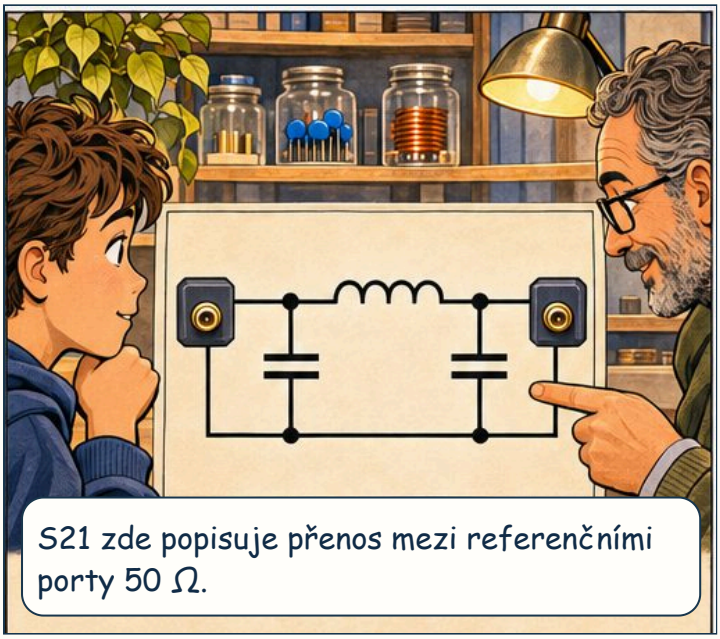
Předpovědět celou křivku



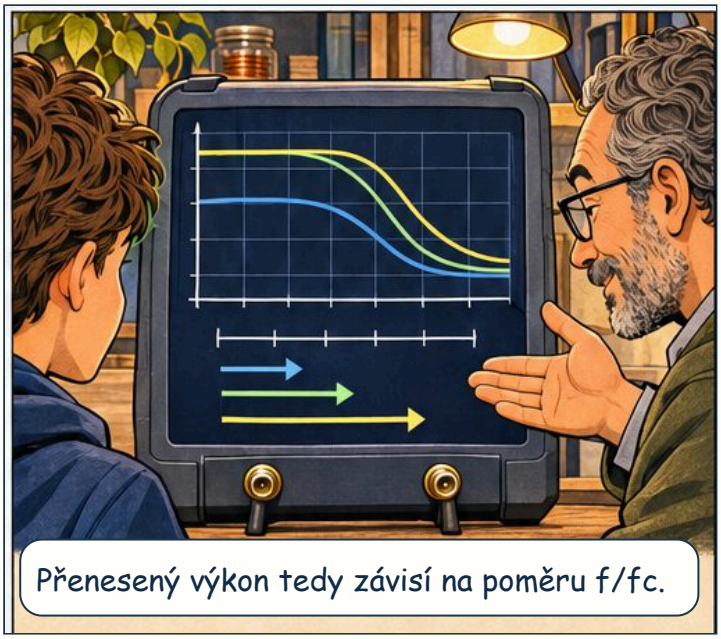
Tři hodnoty ještě nepopisují celou odezvu.



V ideálním modelu je druhá mocnina modulu S21 rovna $1/[1 + (f/fc)^6]$.



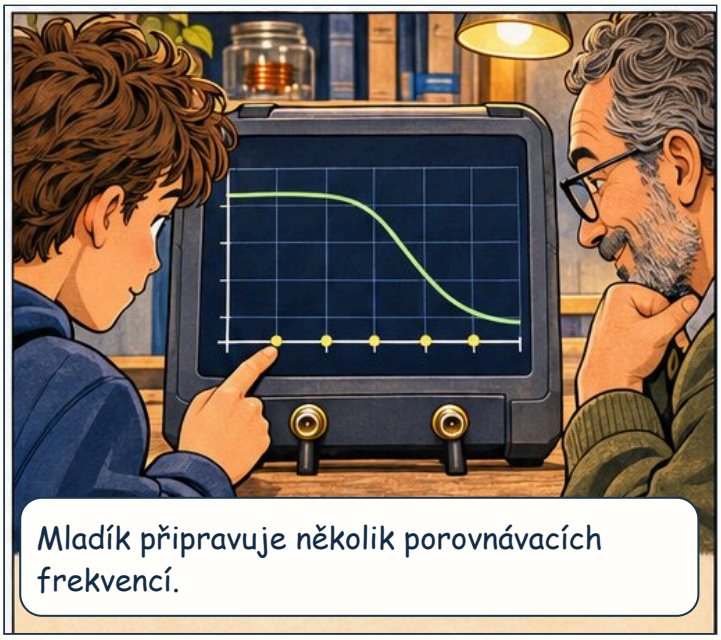
S21 zde popisuje přenos mezi referenčními porty 50 Ω.



Přenesený výkon tedy závisí na poměru f/fc.



Teoretická křivka poskytne vodítko před měřením.



Mladík připravuje několik porovnávacích frekvencí.

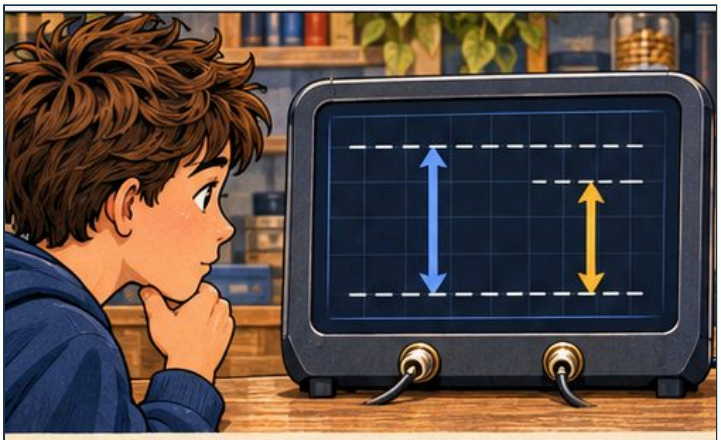
Co znamenají minus tři decibely?



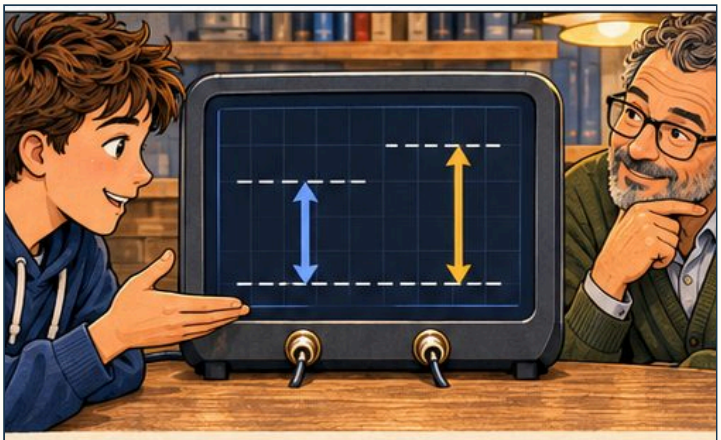
Při f = fc je ideální poměr přenesených výkonů 1/2.



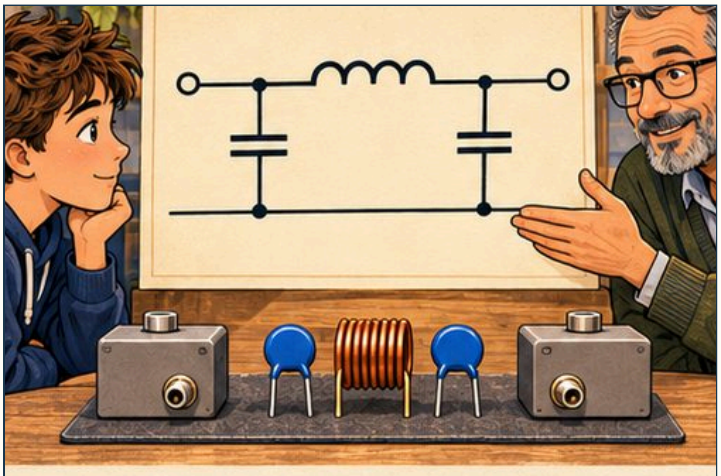
V decibelech vychází 10 log10(1/2) přibližně −3,01 dB.



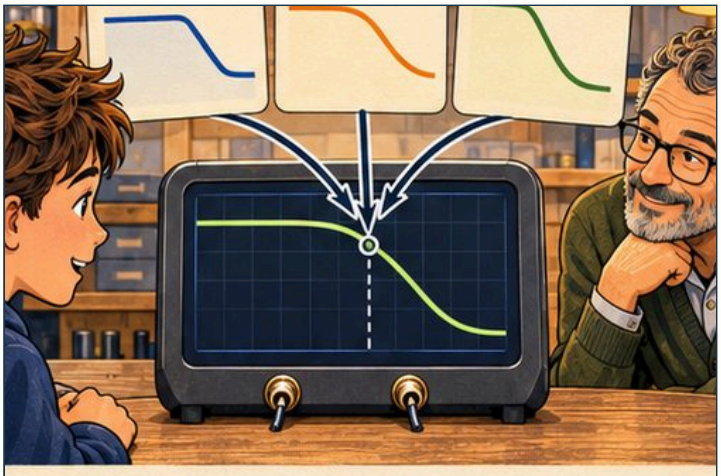
Modul S21 je tehdy přibližně 0,707.



Amplituda tedy není poloviční.



Výpočet používá odpovídající reference 50 Ω.

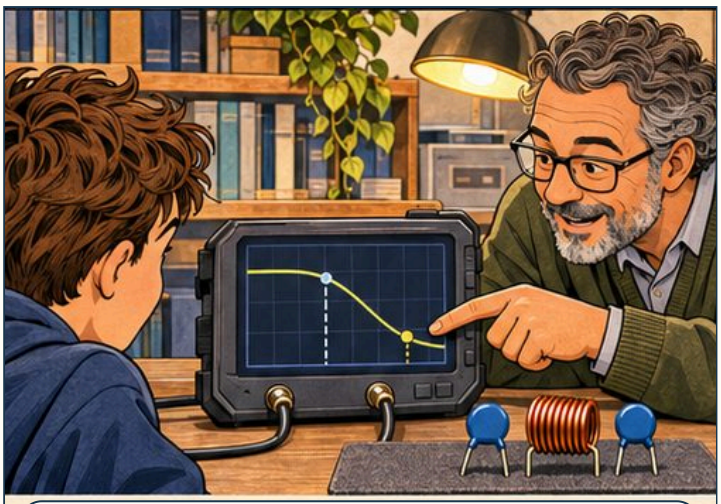


Mladík propojuje tři zápisy téhož bodu křivky.

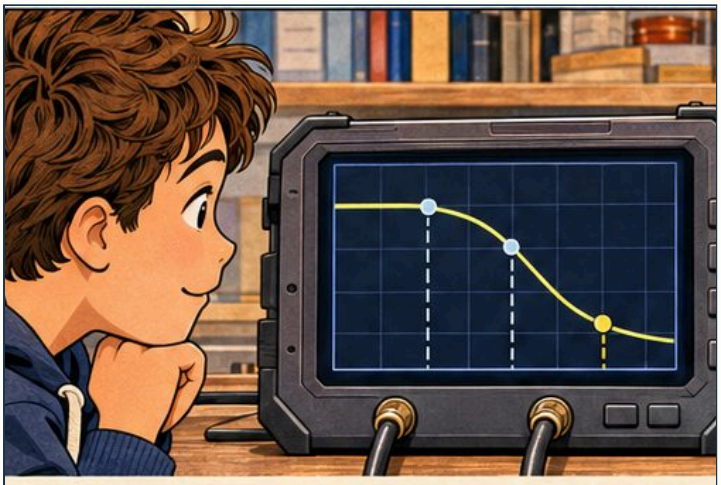
Nad mezní frekvencí



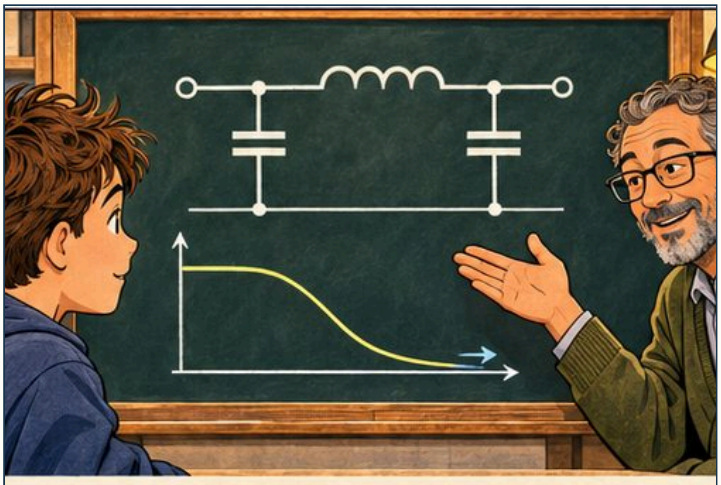
Při 20 MHz je f/fc rovno 2.



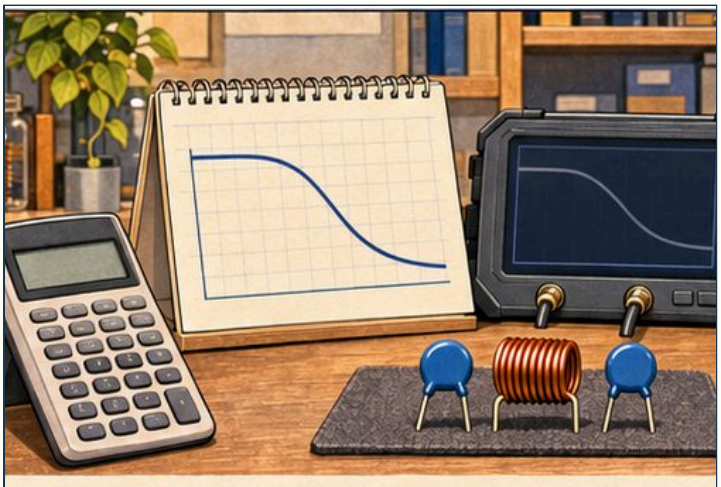
Ideální přenos pak vychází přibližně −18,13 dB.



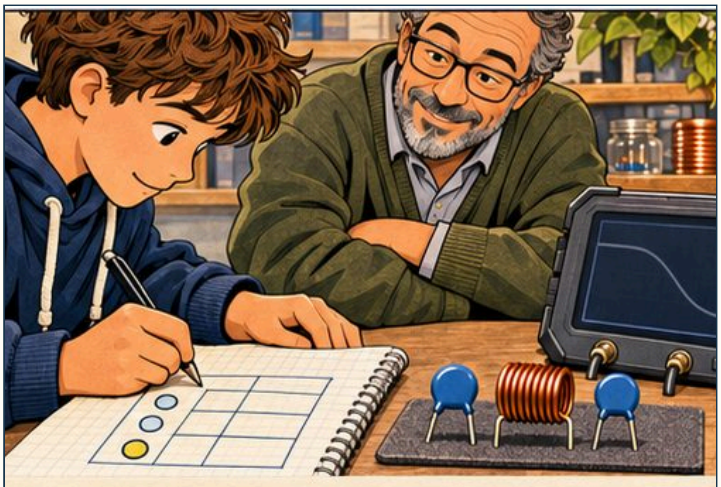
Při 30 MHz je f/fc = 3: přibližně −28,63 dB.



Útlum roste, ale zůstává konečný.

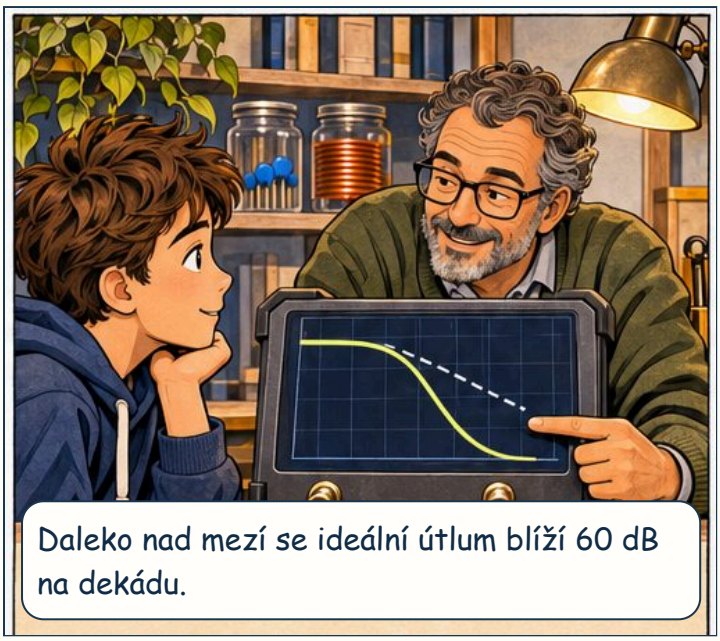


Tyto hodnoty jsou vypočítané, nikoli změřené na jejich obvodu.



Mladík je zapisuje do sloupce předpovědí.

Sklon není záruka



Daleko nad mezí se ideální útlum blíží 60 dB na dekádu.



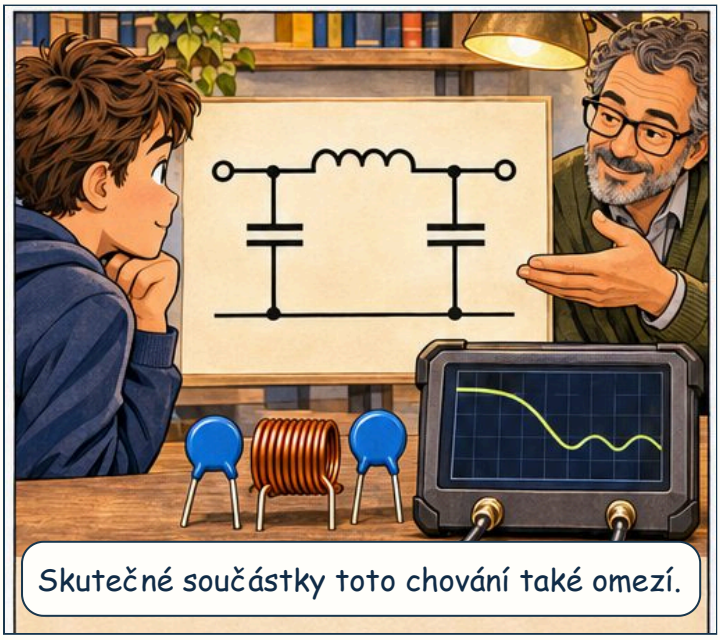
Dekáda znamená desetinásobnou frekvenci.



Tento asymptotický sklon patří modelu třetího řádu.



V blízkosti meze není křivka přímkou.

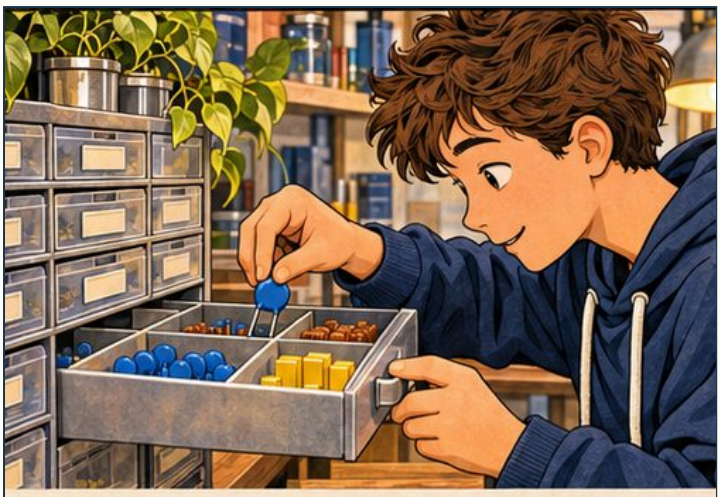


Skutečné součástky toto chování také omezí.

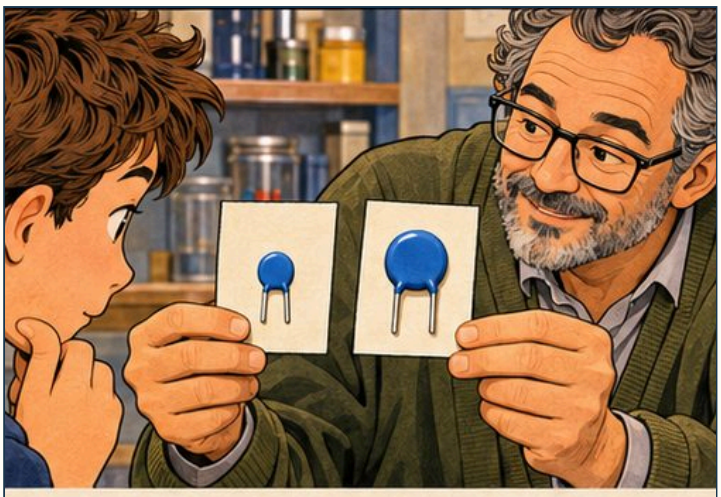


Mladík nepřenáší pravidlo mimo jeho podmínky.

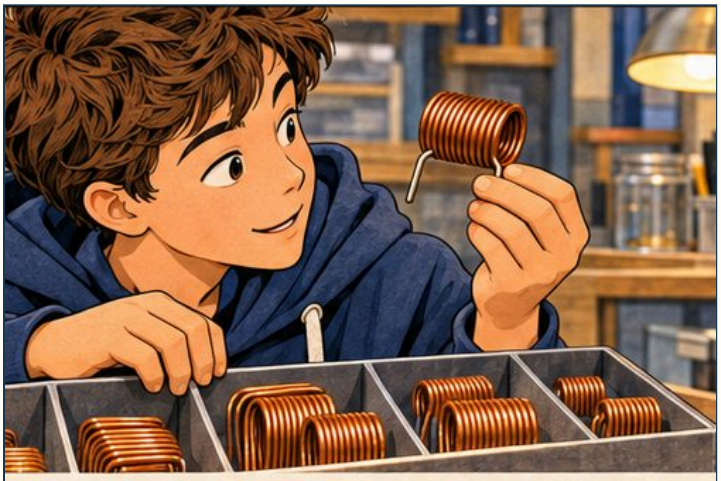
Dostupné hodnoty



V zásuvce nemusí být kondenzátory přesně 318,3 pF.



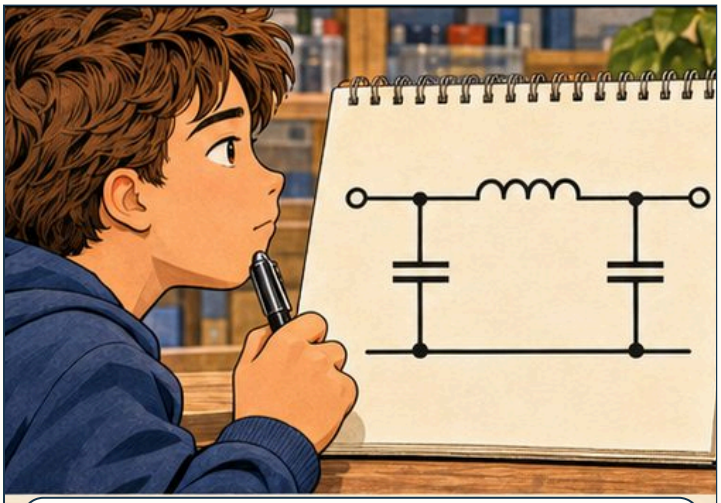
Běžných 330 pF není totéž.



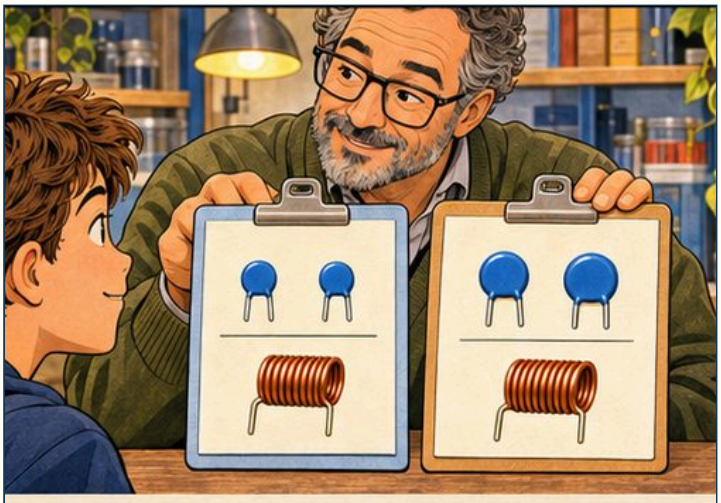
Cívka 1,6 µH se vypočítané hodnotě blíží.



Tyto hodnoty vyžadují nový výpočet nebo simulaci odezvy.

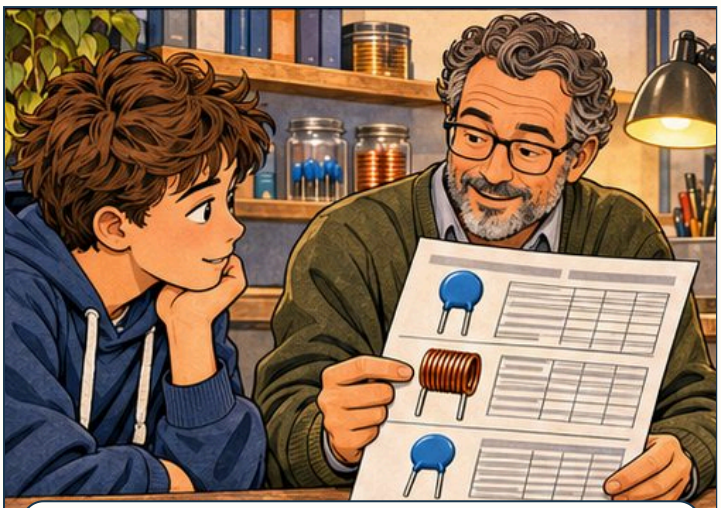


Takový obvod nelze automaticky označit jako přesně 10 MHz.



Mladík odděluje ideální a zvolené hodnoty.

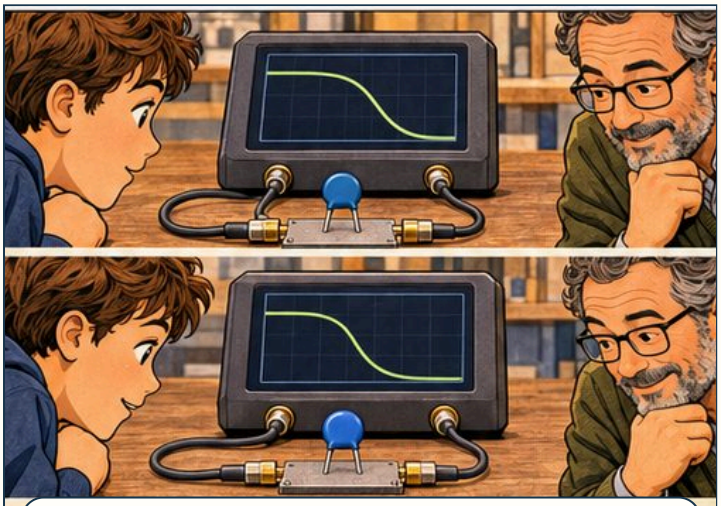
Každý díl má toleranci



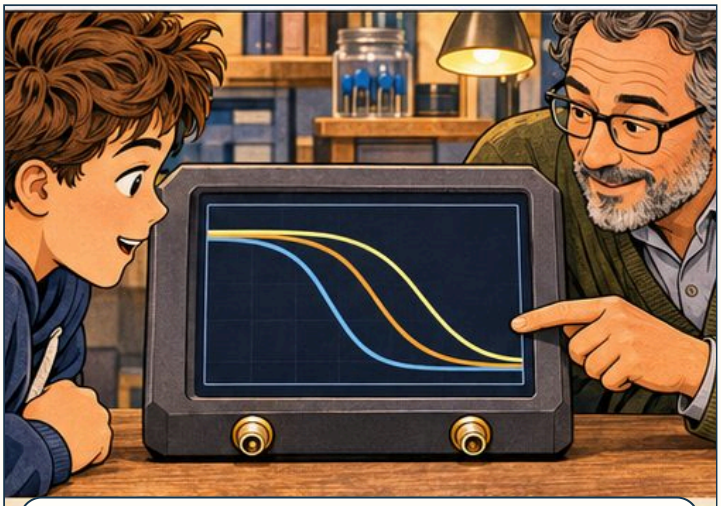
Jmenovitá hodnota není zaručená přesná hodnota.



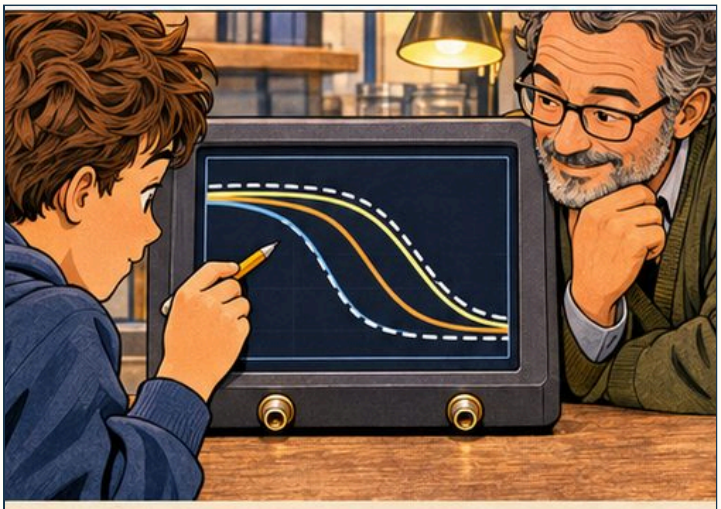
Záleží na tolerancích kondenzátorů i cívky.



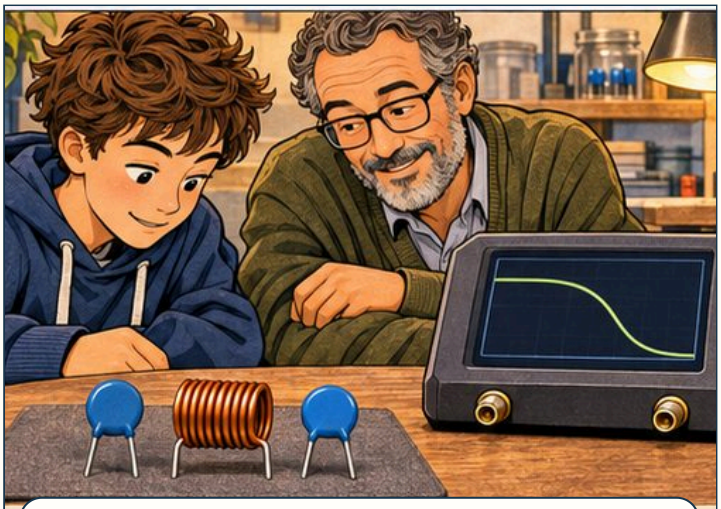
Dvě stejně označené součástky se mohou mírně lišit.



Simulace může prozkoumat několik kombinací hodnot.



Pomáhá předvídat rozsah možných odezev.



Měření pak prověří skutečně použité součástky.

Skryté součástky



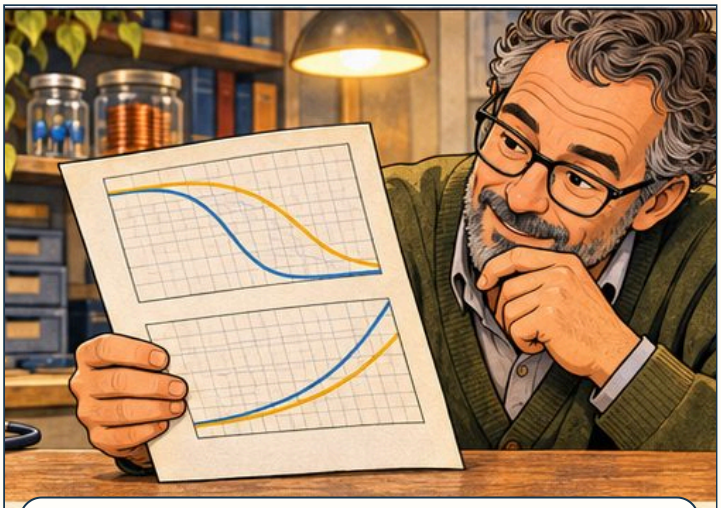
Skutečná cívka má také odpor a parazitní kapacitu.



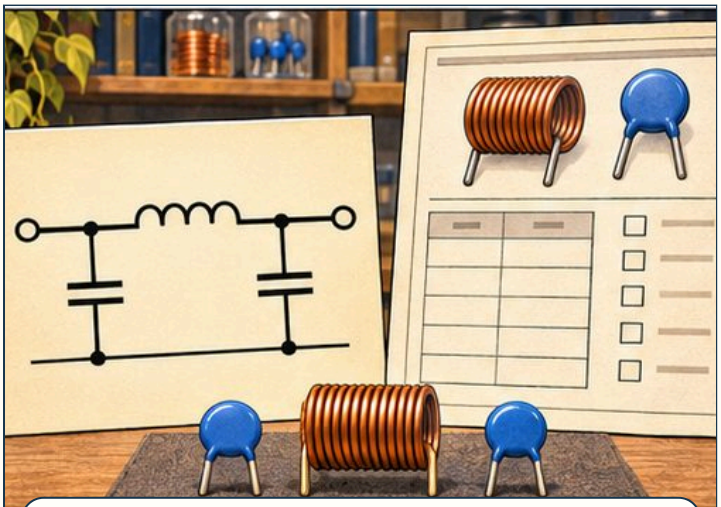
Kondenzátor má mimo jiné ztráty a parazitní indukčnost.



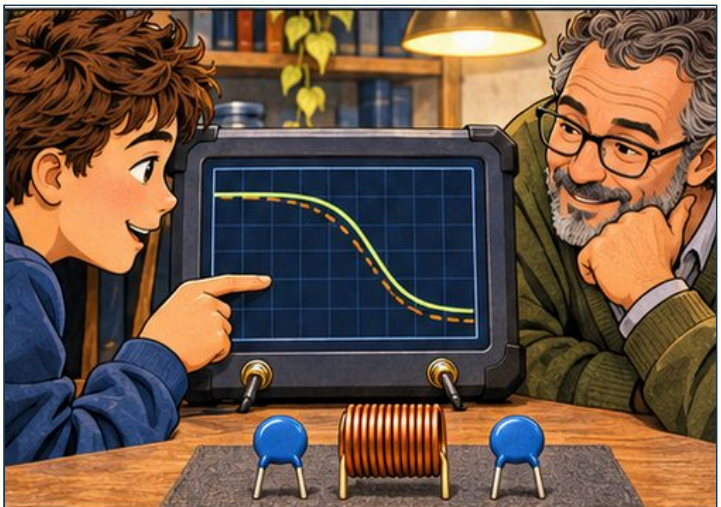
V blízkosti některých rezonancí se jejich chování mění.



Technické listy uvádějí meze, které je třeba prozkoumat.



Samotná hodnota v pikofaradech či mikrohenry tedy nestačí.



Mladík se učí číst dál než první řádek.

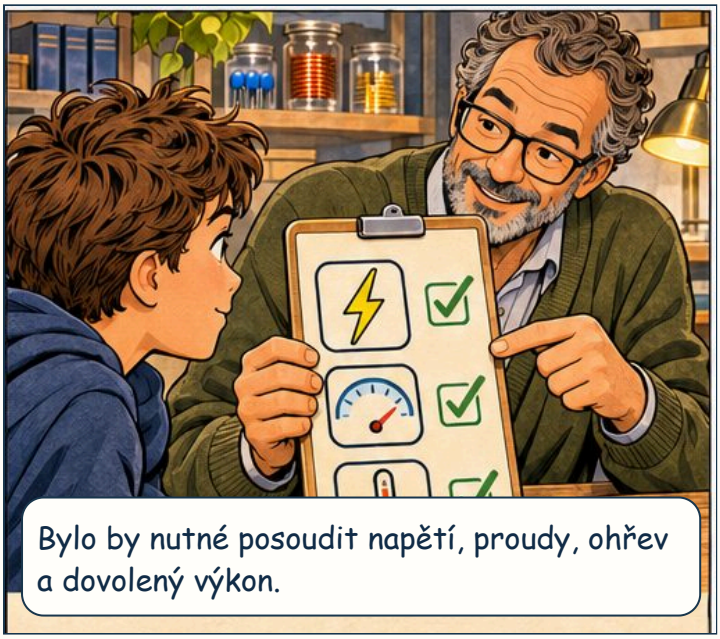
Měřicí pracoviště neurčuje vhodnost pro vysílač



Jejich demonstrátor přijímá pouze slabý signál určený analyzátorem.



Použití při vysílání by vyžadovalo další kontroly.



Bylo by nutné posoudit napětí, proudy, ohřev a dovolený výkon.



Napěťová odolnost kondenzátoru neurčuje způsobilost celého filtru.



Výkonová zkouška do této dílny nepatří.



Mladík jasně zapisuje omezení své realizace.

Návrh rozmístění

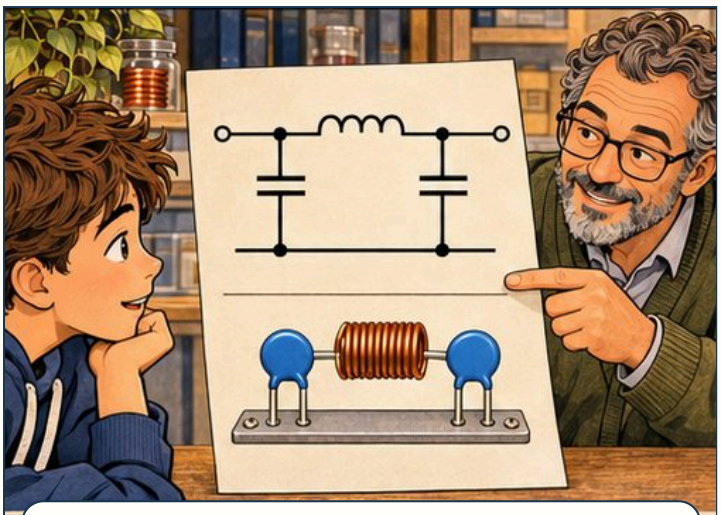
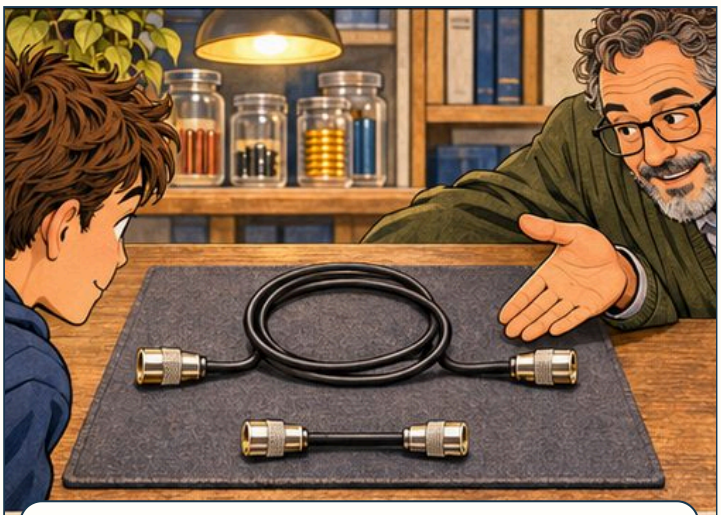
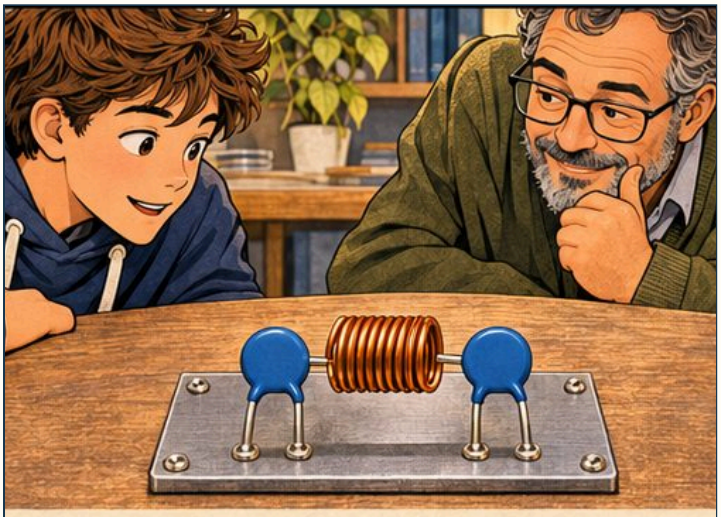


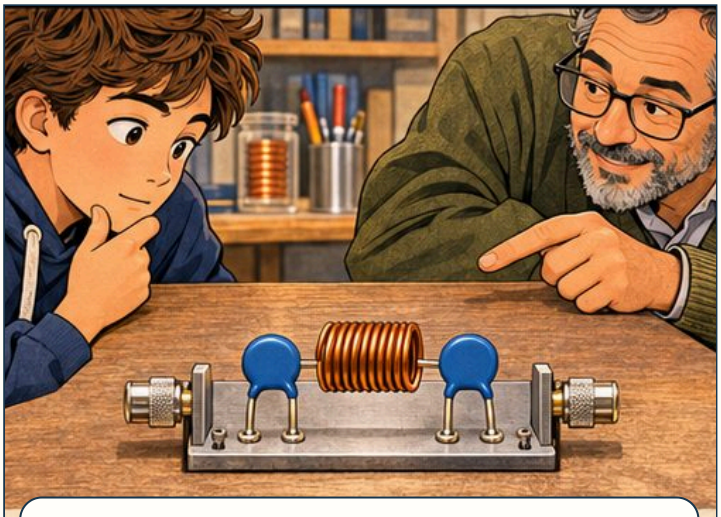
Schéma určuje propojení, ale ne celou jeho geometrii.



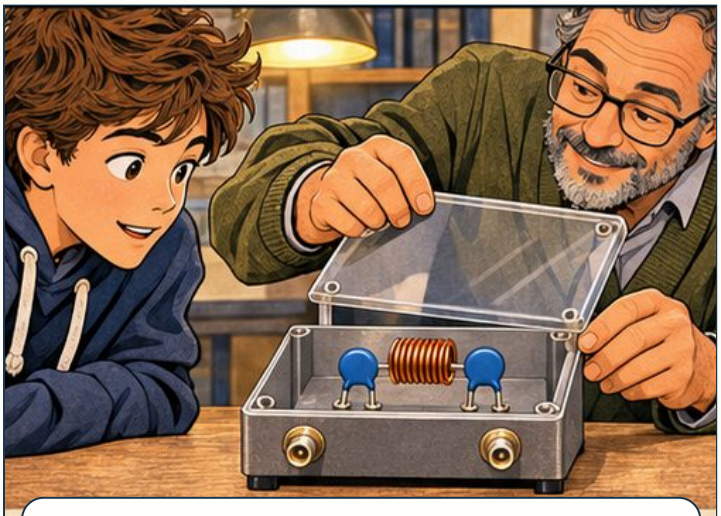
Při těchto frekvencích mohou délky vodičů a rozmístění ovlivnit výsledek.



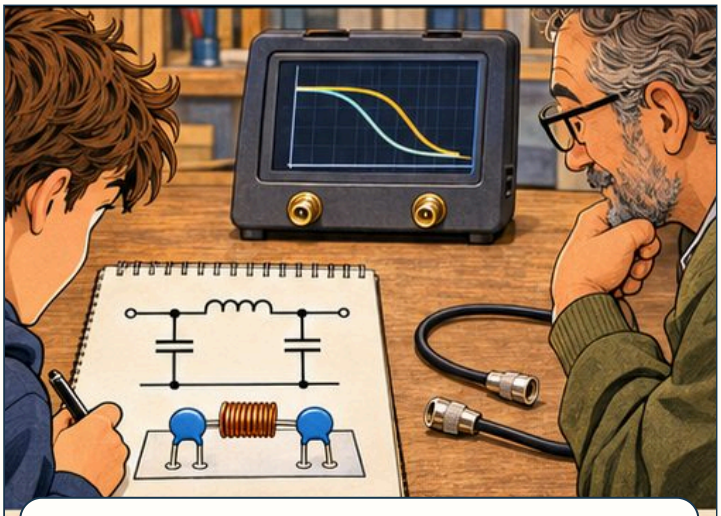
Navrhnou společnou zem a krátká propojení.



Oddělí také cesty, které by se mohly přímo ovlivňovat.



Henri připravuje demonstrátor vhodný k měření.

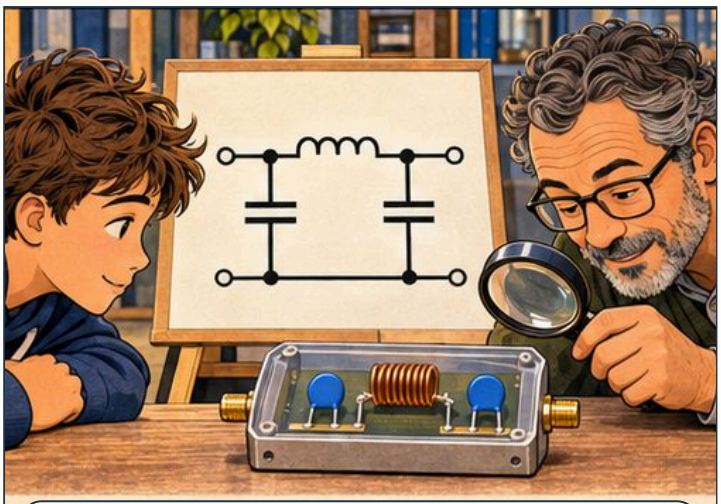


Lucas porovnává rozmístění se schématem spoj po spoji.

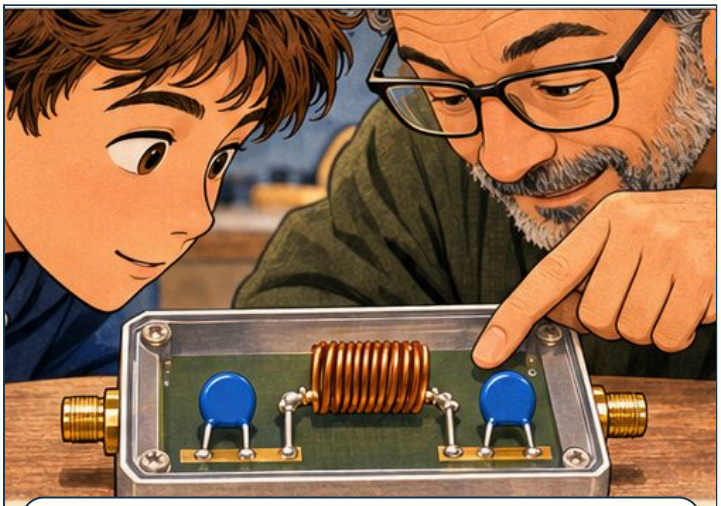
Kontrola před připojením



Měřicí zdroj zůstává při přípravě vypnutý.



Kontrolují propojení, součástky a společnou zem.



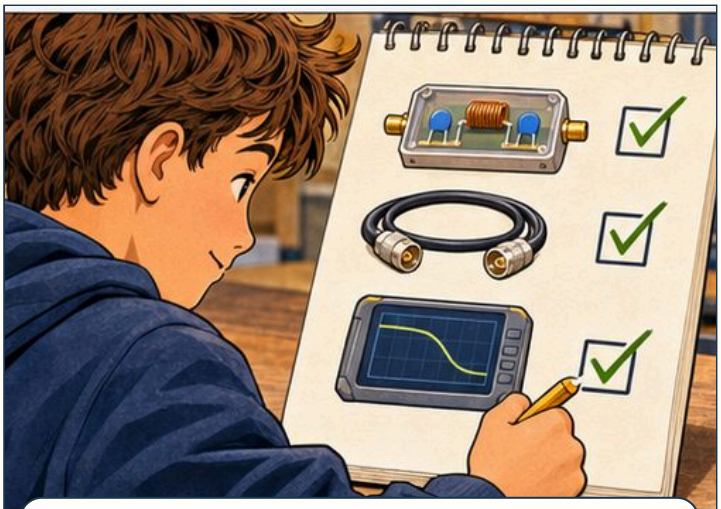
Hledají zkrat, chybný spoj nebo poškozenou součástku.



Poté prohlédnou konektory a kabely.



Mentor ověřuje vstupní meze přístroje.

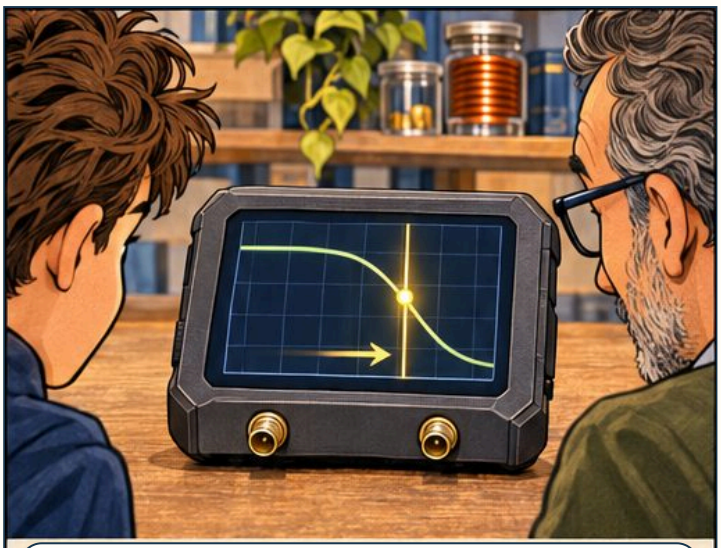


Mladík dokončí seznam před prvním přelaďováním.

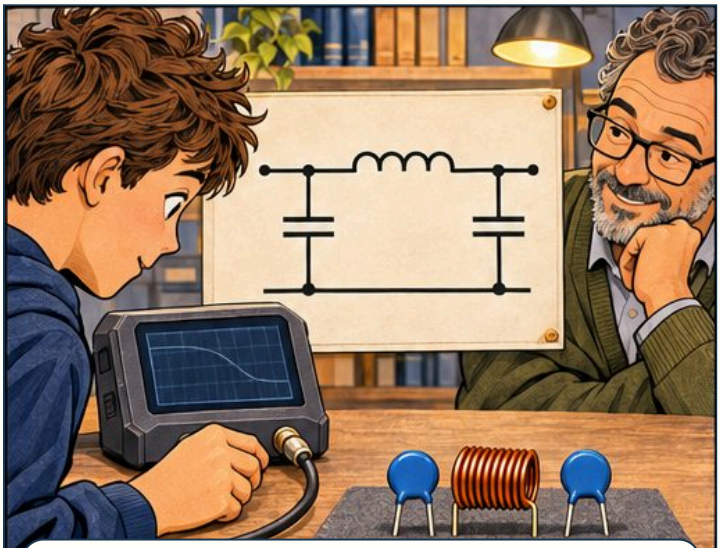
Otázky analyzátoru



Síťový analyzátor vysílá známý slabý signál.



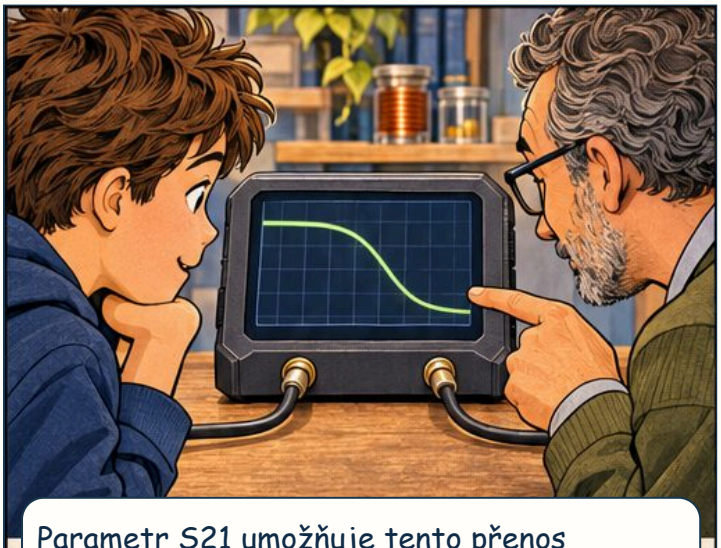
Prochází zvoleným rozsahem frekvencí.



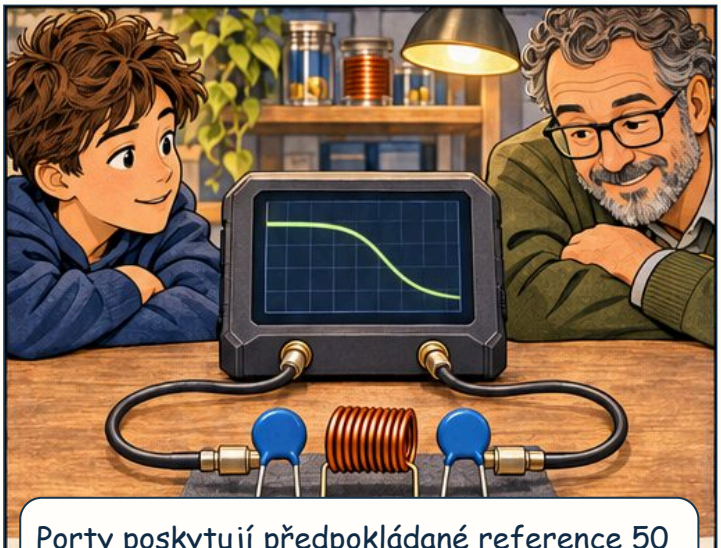
Port 1 napájí vstup filtru.



Port 2 sleduje přenos na jeho výstupu.



Parametr S21 umožňuje tento přenos sledovat.



Porty poskytují předpokládané reference 50 Ω.

Kalibrace na správném místě



K měření přispívají kabely i adaptéry.



Postupují proto podle kalibračního postupu přístroje.



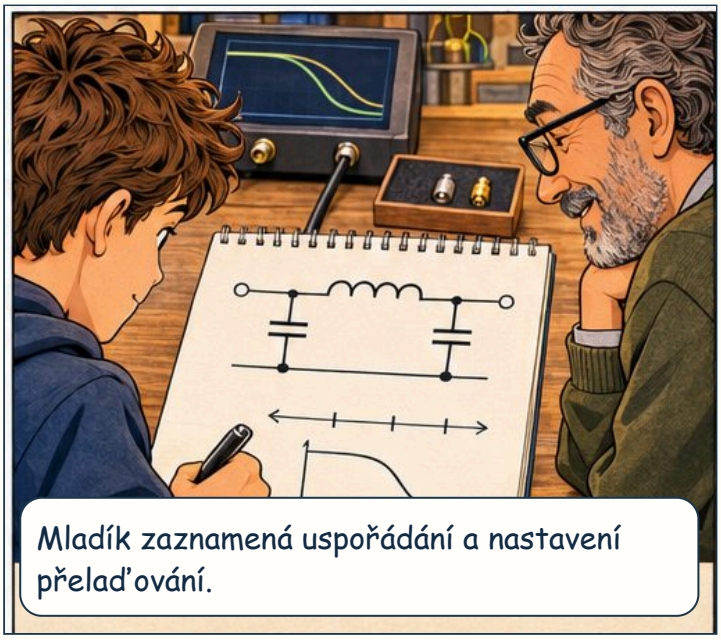
Podle návodu připojí vhodné kalibrační standardy.



Referenční roviny leží na koncích kabelů.



Po kalibraci tato spojení pokud možno zachovají.



Mladík zaznamená uspořádání a nastavení přelaďování.

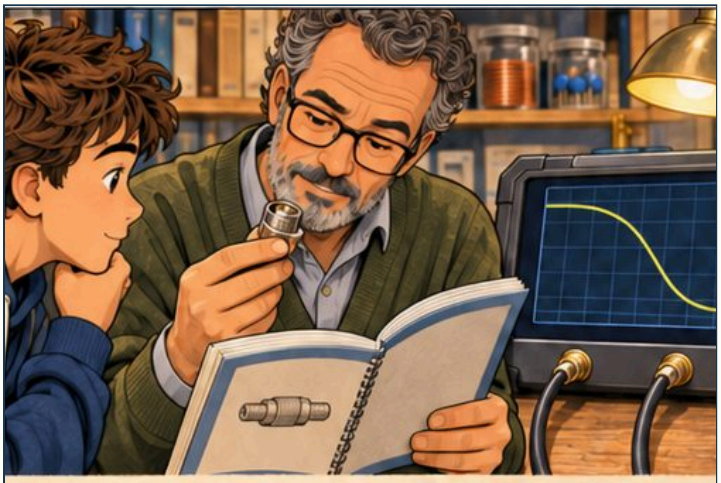
Kontrola přímé cesty



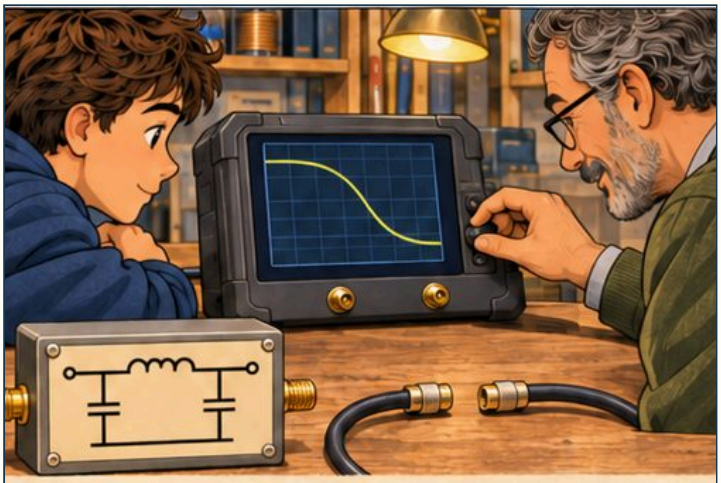
Před filtrem ověří referenci přímým propojením.



Očekávaný přenos musí odpovídat tomuto propojení.



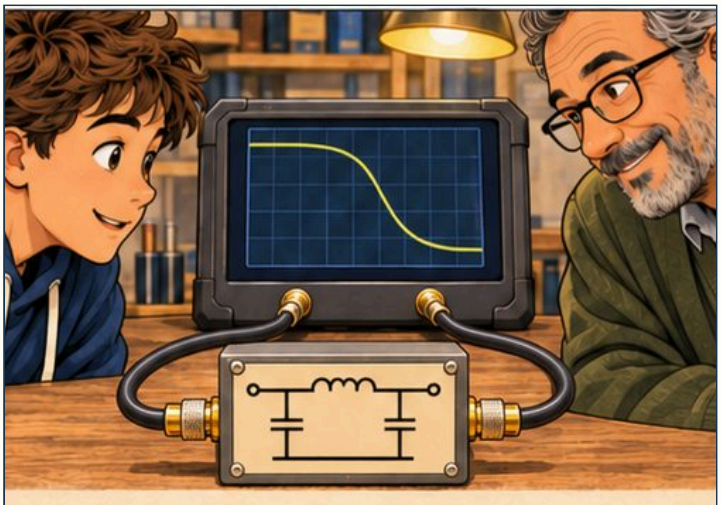
Odchylka vyžaduje kontrolu kabelů, kalibrace a nastavení.



Filtr se neupravuje, aby zakryl závadu měřicího pracoviště.



Po kontrole vypnou zdroj a připraví připojení.

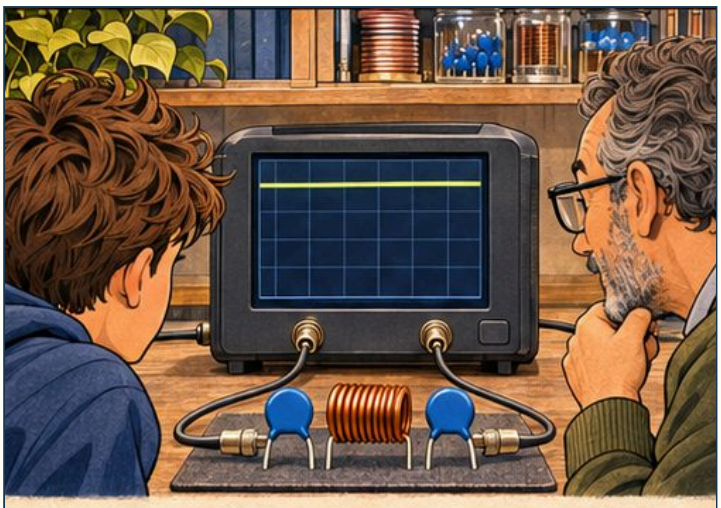


Filtr pak umístí mezi oba kabely.

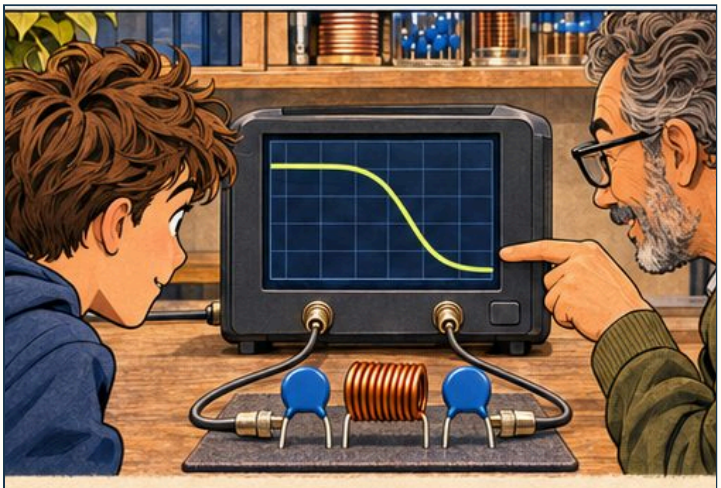
První přelaďování



Spustí přelaďování přes užitečné pásmo i přechodovou oblast.



Křivka zůstává u nízkých frekvencí výše.



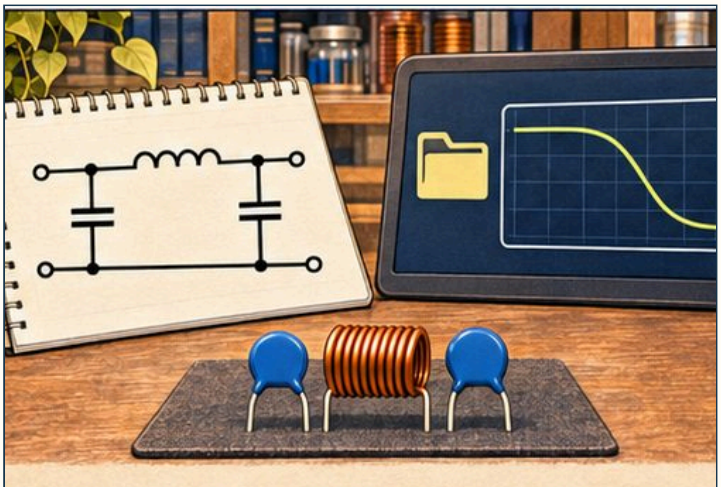
S rostoucí frekvencí pak klesá.



Mladík poznává očekávaný tvar bez předpokladu dokonalé shody.

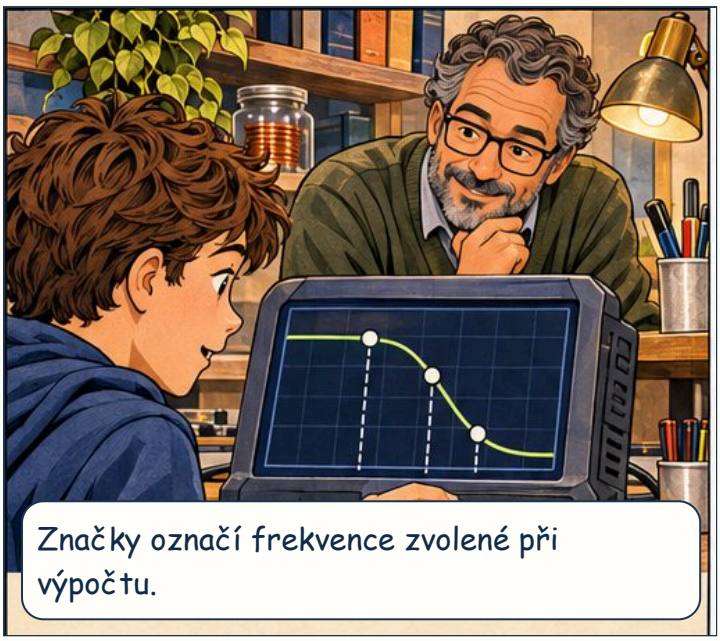


Uloží křivku i podmínky měření.



Uchovaný výsledek lze porovnat po každé změně.

Čtení přesných bodů



Značky označí frekvence zvolené při výpočtu.



Odečtou přenos kolem očekávané mezní frekvence.



Prozkoumají také body výše ve frekvenci.



Skutečné odečty zapíší do sloupce měření.



Zachovají naměřenou hodnotu, i když se liší od předpovědi.



Mladík uvede také datum a uspořádání.

Pochopit odchylku



Pozorovaná mezní frekvence se může lišit od vypočítané.



První vodítka poskytují vybrané hodnoty a jejich tolerance.



Zaslouží si zkoumání i ztráty, rozmístění a kalibrace.



Než obviní vzorec, ověří tyto hypotézy.

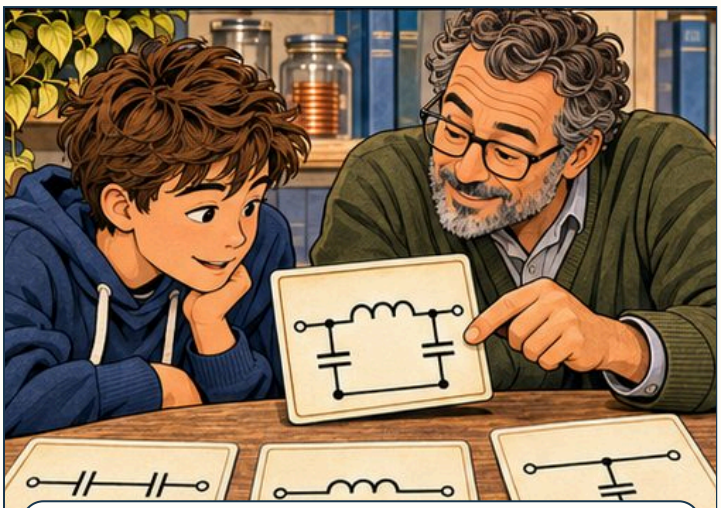


Odlišná křivka sama nevysvětluje svou příčinu.

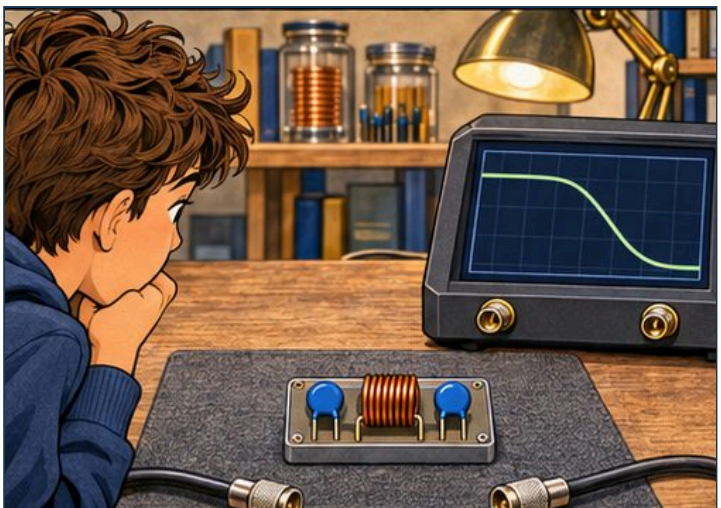


Mladík mění překvapení v novou otázku.

Jedna změna najednou



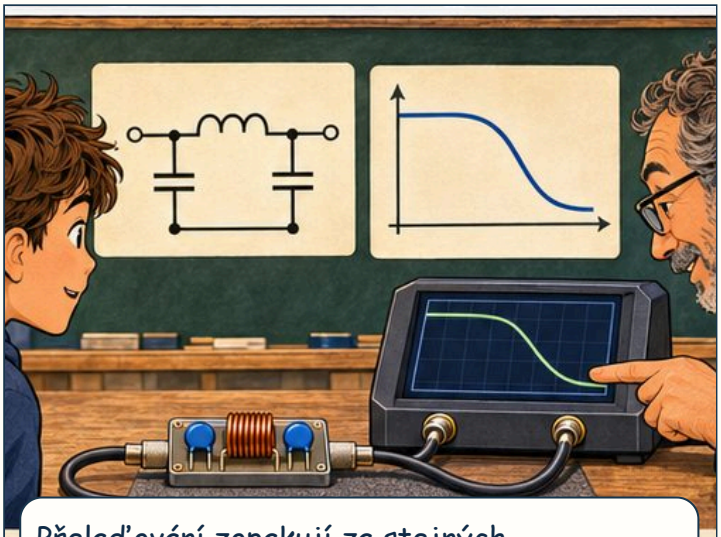
Vyberou jedinou hypotézu a připraví odůvodněnou úpravu.



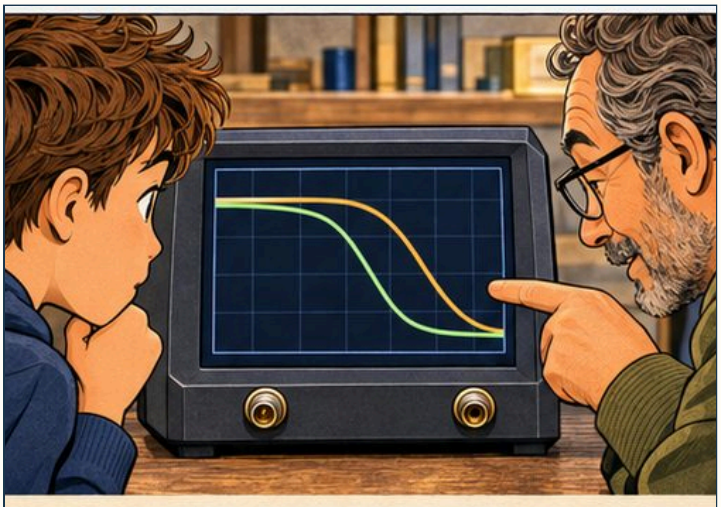
Před zásahem vypnou zdroj a odpojí modul.



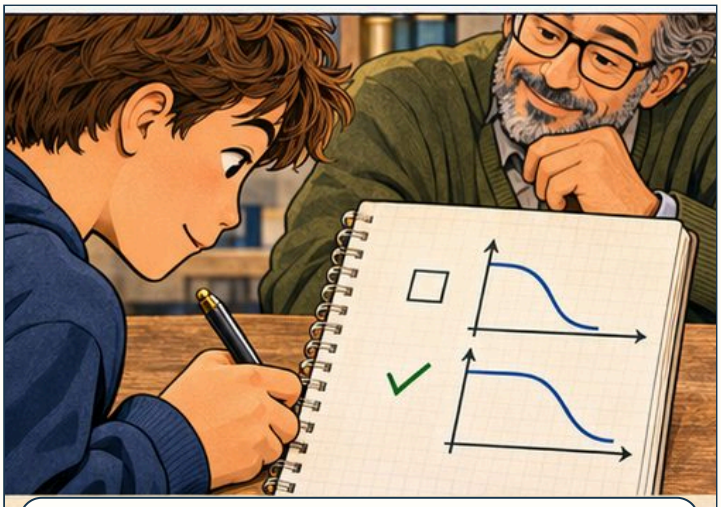
Henri provede změnu a zkontroluje obvod.



Přelaďování zopakují za stejných zaznamenaných podmínek.

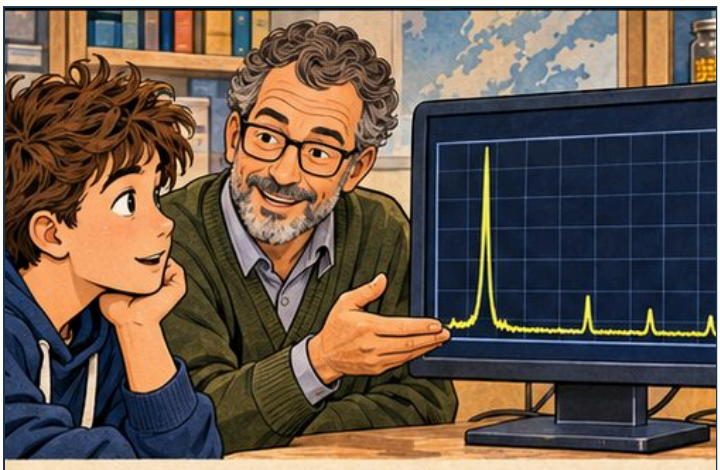


Porovnají starou a novou křivku.

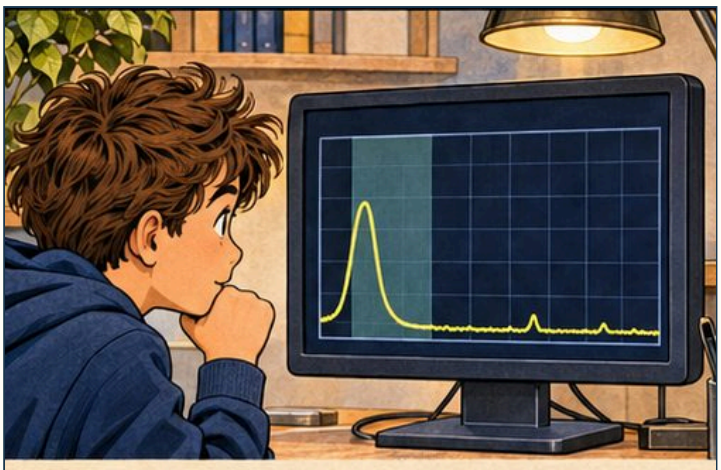


Metoda zabrání promíchání několika možných příčin.

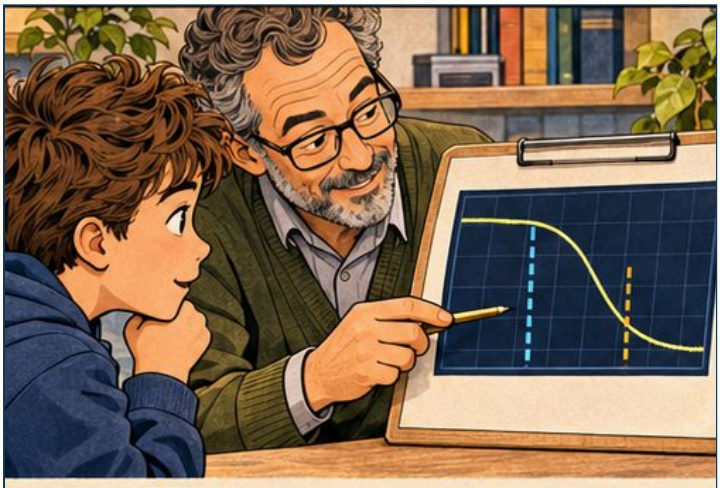
Meze útlumu



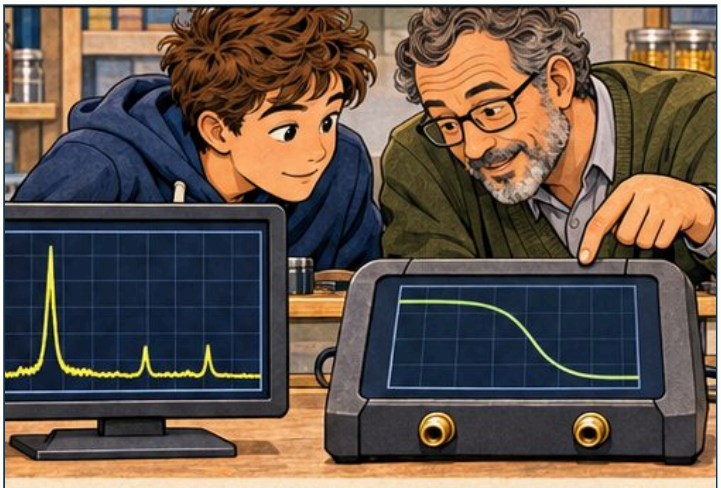
Dolní propust neodstraní všechny nežádoucí složky.



Složka v jejím propustném pásmu bude potlačena málo.



Potlačení závisí na frekvenci i provedení.



Úplná kontrola spektra by vyžadovala další vhodná měření.

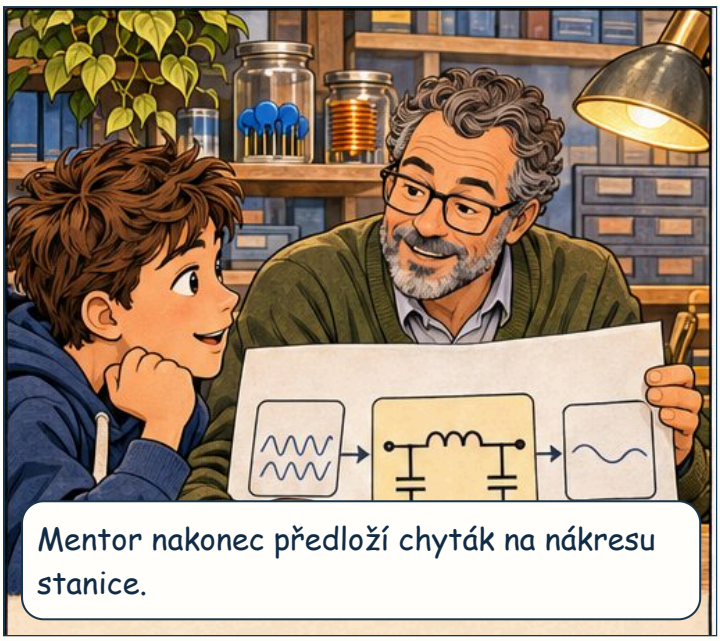


Přítomnost filtru neprokazuje shodu stanice s předpisy.



Mladík rozlišuje užitečnou funkci a obecnou záruku.

Užitečná frekvence musí projít



Mentor nakonec předloží chyták na nákresu stanice.



Nákres spojuje 14,2 MHz s jejich mezí 10 MHz.



Mladík pozná, že 14,2 MHz leží nad touto mezí.



Taková volba by tlumila i požadovaný signál.

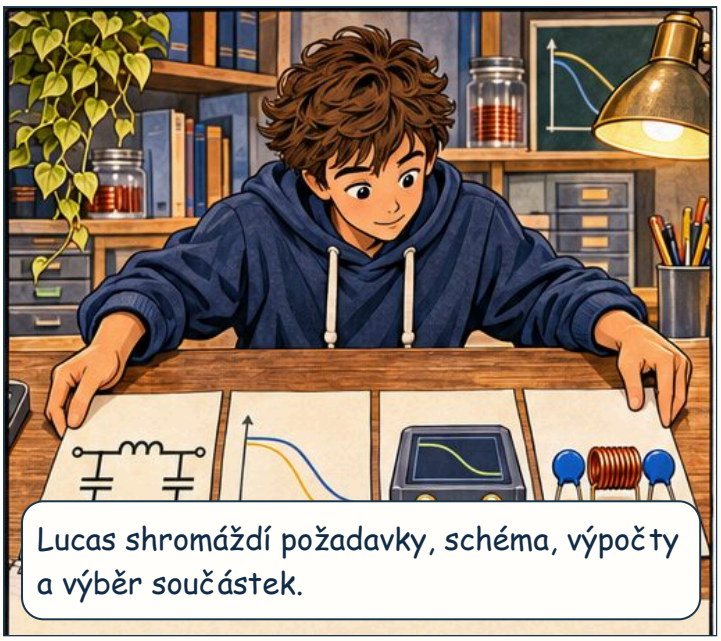


Před použitím je nutné znovu projít zadání.



Ukázkový výpočet nevytváří univerzální filtr.

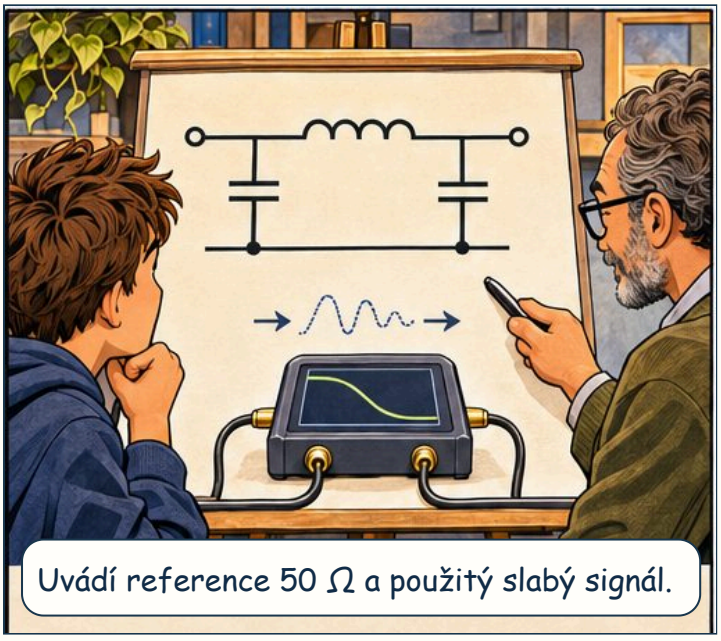
Připravit vysvětlení pro ostatní



Lucas shromáždí požadavky, schéma, výpočty a výběr součástek.



Odlišuje předpovědi od skutečně pozorovaných výsledků.



Uvádí reference 50 Ω a použitý slabý signál.



Uchovává křivky, kalibraci a omezení experimentu.



Henri hraje návštěvníka a klade poslední otázku.



Mladík už dokáže vysvětlit význam každé podmínky.

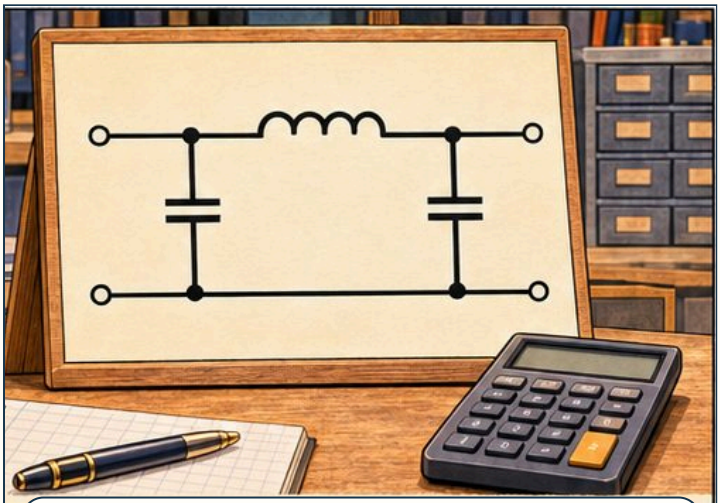
Pochopit, vypočítat, změřit



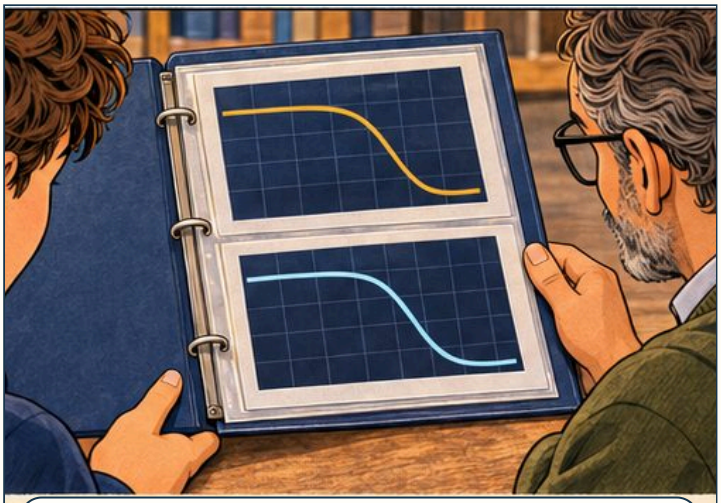
Tři součástky se vracejí do výukové krabice.



Mladík už propojuje požadavek s odezvou filtru.



Umí vypočítat tento Butterworthův π filtr a ověřit jednotky.



Umí také měřit, porovnávat a zkoumat odchylky.



Zápisník uchovává metodu s jejími předpoklady a omezeními.



Další objev v klubu už začíná novou otázkou.