



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava Fakulta elektrotechniky a informatiky



VŠB TECHNICKÁ
UNIVERZITA
OSTRAVA

Detektory ionizujícího záření

Tomáš Brunclík

Brno 2019



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



Název: Detektory ionizujícího záření

Autor: Ing. Tomáš Brunclík

Vydání: první, 2019 Počet stran: 17 Studijní materiály pro studijní program „Aplikovaná fyzika“ bakalářského studia Fakulty elektrotechniky a informatiky.

Jazyková korektura: nebyla provedena.

© Tomáš Brunclík © VŠB – Technická univerzita Ostrava

Poděkování

Příprava tohoto studijního materiálu si vyžádala rovněž úsilí mých kolegů, kterým tímto děkuji. Jsou to především Ing. Ivan Kašparec a RNDr. Alois Zeman.

Dále bych rád poděkoval představitelům katedry Fyziky, VŠB-TUO, jmenovitě prof. Ing. Liboru Hlaváčovi, Ph.D., doc. RNDr. Petrovi Alexovi a Mgr. Ing. Kamile Hrabovské, Ph.D.

Tento materiál vzniknul za podpory projektu Technika pro budoucnost, číslo projektu CZ.02.2.69/0.0/0.0/16_015/0002338

Úvod

Praktická cvičení jsou rozdělena na dvě části. V tomto prvním bloku se věnujeme především měření vlastností používaných detektorů. Zvládnutí úloh je podmínkou pro pokračování v druhém bloku cvičení, kde se nabyté znalosti uplatňují při sestavování a diagnostice již celých přístrojů.

Byl proveden rozbor a vytipování praktických úloh vhodných pro předvýrobní praxi studentů s ohledem na materiální a personální zabezpečení.

Během rozboru jsme zohlednili hlavní smysl úloh pro předvýrobní praxi. Tím je zprostředkovat studentům prověření znalostí nabytých v teorii v reálných úlohách a aplikacích, tak jak jsou používány při výrobě přístrojů. Z důvodu ochrany studentů před negativním dopadem ionizujícího záření jsme se zaměřili na základní úlohy s použitím nevýznamných zdrojů ionizujícího záření a zdrojů z přírodního pozadí. Pro studenty tímto platí stejné úrovně jako pro civilní obyvatelstvo.

Stanovení V/A charakteristiky fotonásobiče

Volt ampérovou charakteristikou fotonásobiče je míněna závislost amplitudy proudového impulsu dodaného násobícím procesem na velikosti rozdílového napětí mezi fotokatodou a anodou. V celé úvaze zde hraje i roli poměr napětí na dynodách, ale pro většinu aplikací je tento konstantní a daný poměrovým rezistorovým děličem. U většiny námi konstruovaných přístrojů je používáno výrobcem doporučené zapojení děliče.

Pro stanovení amplitudy impulsu bude nutné použít statistickou metodu. Je to proto, že v konfiguraci scintilačního detektoru s fotonásobičem tento je zásobován celým spektrem světelných fotonů o různých energiích a tyto není možné filtrovat. Proto se použije spektrometr záření a vhodný monoenergetický zdroj. Amplituda vybraných pulsů je potom stanovena z pozice fotopíku daného zdroje ve spektru.

Potřebné vybavení a pomůcky:

Scintilační detektor s fotonásobičem.
Spektrometr gama záření
Zesilovač s proměnným zesílením
Regulovatelný zdroj vysokého napětí
Vysokonapěťový voltmetr
Bodový zdroj 241 Am

Provedení:

Detektor umístíme na měkkou podložku.

Na čelo detektoru přilepíme lepicí páskou nevýznamný bodový zdroj záření 241 Am.

Nastavíme vysoké napětí na 50V.

Nastavíme zesílení spektrometru tak, abychom umístili fotopík 241 Am na 20. kanál ve spektru.

Zesílení si poznamenejme.

Zvýšíme vysoké napětí o 10V.

Počkáme cca 1 minutu do ustálení vnitřního náboje ve fotonásobiči.

Spustíme spektrometr a odečteme novou pozici fotopíku.

Takto pokračujeme až do dosažení pozice píku okolo 1000 kanálu.

Pokud vysoké napětí nepřekročilo maximální hodnotu udávanou výrobcem, snížíme zesílení 10x. Tím posuneme pozici fotopíku na pozici okolo 100. kanálu.

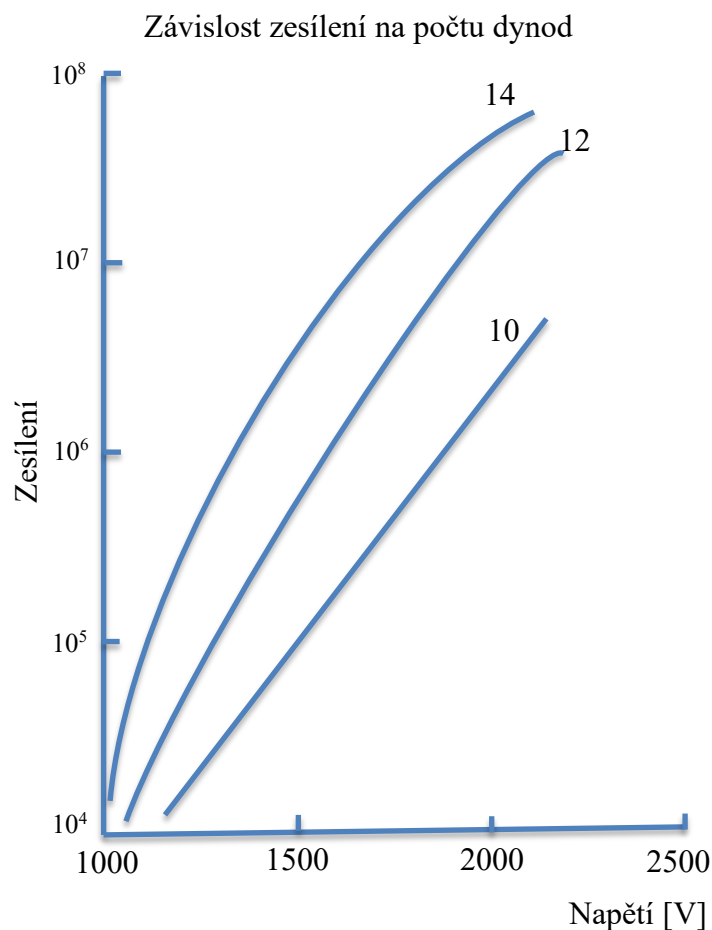
Překontrolujte přeměřením novou pozici fotopíku pro novou hodnotu zesílení

Opět zvyšujte vysoké napětí a odečítejte pozici fotopíku až do dosažení maximálního povoleného vysokého napětí.

Charakteristiku fotonásobiče vyneste do grafu, kde nezávislou proměnnou bude vysoké napětí a závislou pozice fotopíku v kanálech. Pozice fotopíku je úměrná proporcčně zesílení fotonásobiče.

Námět k diskuzi:

Ukázka charakteristiky fotonásobiče je na obrázku.



V grafu je demonstrována závislost zesílení na napětí. Zesílení představuje faktor referenčního pulsu, kolikrát se zvětšila jeho amplituda. Tedy jak veliký proudový impuls byl vytvořen. V použité měřicí metodě toto odpovídá pozici fotopíku.

Závislost je důležitá pro vhodnou volbu druhu fotonásobiče a jeho pracovní oblasti. Některé aplikace požadují co největší zesílení bez ohledu na linearitu, proto se volí fotonásobiče s větším množstvím dynod, jiné aplikace potřebují lineární charakteristiku a zde jsou používány fotonásobiče s nižším počtem dynod.

Stanovení závislosti citlivosti scintilačního detektoru na energii gama fotonů

Množství emitovaného světla ve scintilátoru není přímo úměrné energii absorbovaného fotonu gama záření. Důvodem je především nelineární závislost absorpce gama záření samotného a potom kvantové děje v scintilátoru. Kromě typu scintilátoru, který hraje klíčovou roli, se na tvaru závislosti podílí i skladba materiálů obklopujících detektor. Toho se mimo jiné využívá při energetické korekci citlivosti některých typů detektorů.

Potřebné vybavení a pomůcky:

Scintilační detektor s fotonásobičem.

Spektrometr gama záření

Bodový zdroje kalibrované ^{241}Am , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{232}Th

Tabulky výtěžností energií fotonů radioizotopů.

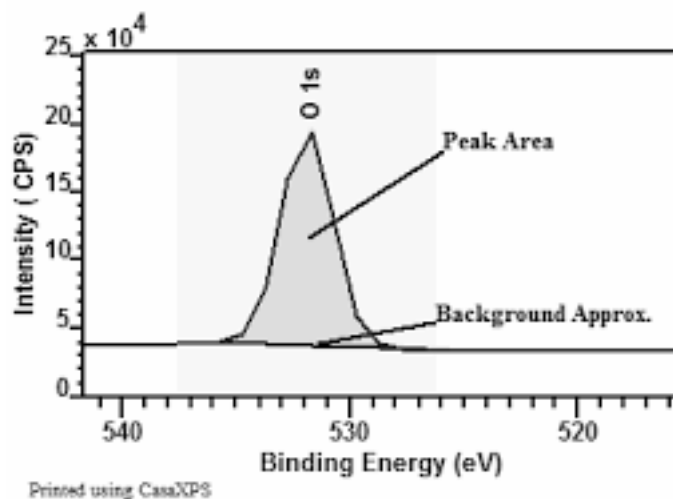
Provedení:

Samotné měření je nutné provádět velmi pečlivě protože odchylky při umísťování zdrojů vůči detektoru mohou představovat významný zdroj chyb. Obecně platí, že čím bližší je vzdálenost zdroje k detektoru tím více se projeví nepřesnosti v umístění zdrojů v množství registrovaných fotonů. Je to dáno tím, že množství fotonů dopadajících ze zdroje na detektor není lineární se vzájemnou vzdáleností. Tato závislost je v ideálním případě kvadratická, ve skutečnosti ji ještě komplikuje vzájemný poměr vstřícných ploch detektoru a zdroje. Nejedná se totiž o ideální bodový zdroj a detektor, nýbrž o aktivní plochu detektoru a plochu, ze které jsou vyzařovány fotony. Příliš velká vzdálenost však ze stejného důvodu povede k poklesu množství detekovatelných fotonů pod detekční mez danou místním radiačním pozadím. Proto je nutno experimentovat optimální místo pro umístění zdrojů k detektoru a to tak, aby píky ve spektru byly dobře viditelné a daly se určit jejich paty.

Podstatou experimentu je určit kolik procent z emitovaných gama fotonů ze zdroje je absorbováno detektorem mechanismem fotopíkové absorpce. Proto je nutno použít kalibrované zdroje. U těchto je nutno dopočítat jejich aktivitu v době experimentu. Zdroj záření umístíme k detektoru na stanovené místo (všechny zdroje musí být umístěny stejně) a naměříme spektrum. Toto uložíme pro další zpracování. Takto postupujeme se všemi dostupnými zdroji. Nakonec naměříme místní radiační pozadí. Doba integrace spekter by měla být stejná, pak nebude nutná časová normalizace spekter.

Spektra zářičů se dále očistí od místního radiačního pozadí. Děje se to tak, že se od každého kanálu spektra zářiče odečte nápočet identického kanálu pozadí. Tím jsou spektra očištěna o lineární pozadí.

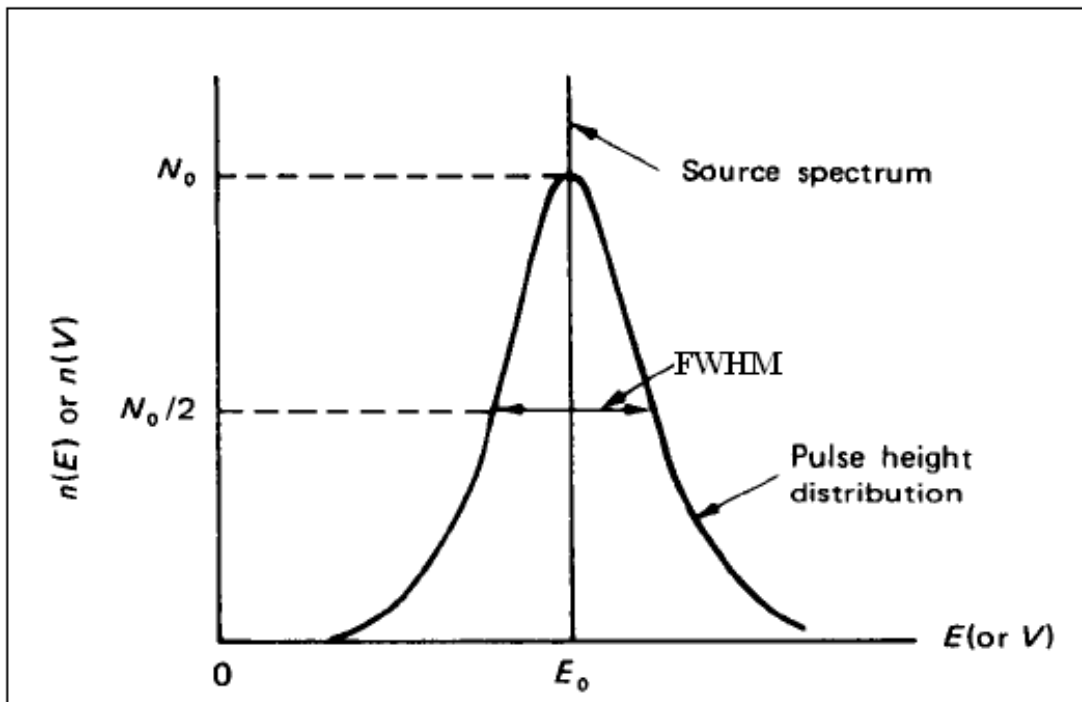
Dalším krokem je stanovení čistých ploch píků ve spektrech, peak area. To se stanovuje jako suma nápočtů v kanálech ohraničených levou a pravou patou píků očistěných o takzvané nelineární pozadí. Děje se to tak, že se proloží přímka mezi patami píků (Background Approximation). Přímka potom určuje kolik impulzů se odečte pro konkrétní kanál.



Tímto způsobem se stanoví tabulka energií píků ve spektrech a jejich intenzit. Posledním krokem je dopočítání skutečného množství fotonů, které byly pro každou jednu energii emitovány ze zdroje. To se provede tak, že okamžitá aktivita zdroje v Bq, což představuje množství radioaktivních rozpadů zdroje za sekundu vynásobí výtěžností fotonů pro konkrétní energii a dobou měření spekter. Výtěžnost udává kolik gama fotonů konkrétní energie je skutečně vyzářeno. Například Cs 137 má pro energii 662 keV výtěžnost 0.86. Tedy při 100 rozpadech bude vyzářeno 86 fotonů. Skutečné množství registrovaných fotonů ve spektru děleno celkovým množstvím fotonů emitovaných je potom účinnost detekce měřicího uspořádání pro konkrétní energii. Vynesení závislosti účinnosti detekce na energii potom představuje takzvanou píkovou účinnostní křivku. Tato slouží pro měření aktivit jiných zdrojů záření.

Stanovení rozlišení FWHM scintilačního detektoru typu NaI/Tl and BGO

Rozlišení scintilačního detektoru se definuje jako šířka fotopíku v jeho polovině amplitudy. Protože tato šířka je závislá na energii, používá se standardně energie 662 keV. Definice je patrná z obrázku.



Potřebné vybavení a pomůcky:

Scintilační detektory NaI/Tl a BGO s fotonásobiči.

Spektrometr gama záření

Bodový zdroj ^{137}Cs

Provedení:

Zdroj záření se umístí k detektoru. Dále se nastaví zesílení tak, aby maximum píku leželo na 200. kanálu. Ze spektra se odečte jeho amplituda, měl by to být nápočet v 200. kanále. Potom se hledají body vlevo a vpravo od maxima píku, kde hodnota nápočtu je poloviční. V těchto bodech se odečte pozice kanálu. Vzdálenost v kanálech pozice vlevo a vpravo je potom absolutní rozlišení. Jeho hodnota normovaná pozicí maxima (200) je relativní rozlišení v procentech.

Měření se provede pro oba typy krystalů.

Rozlišení FWHM je jeden z nejdůležitějších parametrů krystalů. Její pravidelné sledování je nezbytné pro identifikaci případné degradace vlastního krystalu. Pokud je detektor v pořádku, FWHM se s dobou života nemění.

Zjištění stability detektoru a odolnost vůči přetížení

Stabilita vůči přetížení patří mezi další důležité vlastnosti radiometrických systémů. Možným zdrojem problémů jsou špatně navržené zdroje vysokého napětí a vlastní konstrukce fotonásobičů. Při fotoelektrickém jevu na fotokatodě fotonásobiče dochází k uvolňování elektronů, které opouštějí povrch fotokatody a putují vstříc dynodovému násobiči. Uvolněná místa po elektronech na fotokatodě musí být co nejdříve zaplněna novými elektrony. Cesta elektronů do celkem velké oblasti fotokatody s omezenou vodivostí a nehomogenitami způsobenými technologií napařování je unikátní pro každý jeden fotonásobič. Není prakticky možné plně kontrolovat výrobní proces tak, aby byly produkční kusy identické. Proto je nutné stanovovat rozmezí parametrů a vybírat vyrobené kusy tak, aby tyto splňovaly.

Problémem nerovnoměrného napaření vrstev na fotokatodě a dynodách spolu s variabilním mechanickým uspořádáním dynod je, že při větším toku elektronů dochází nedostatečné obnově valenční vrstvy fotokatody, nebo k částečnému odklonu svazku elektronů na dynodách. Důsledkem je pak pokles násobícího koeficientu fotonásobiče. Může však nastat i opačný případ, že původní svazek nebyl správně vychylován vůči dynodám a při vyšším zatížení je toto vychýlení kompenzováno a dojde ke zvýšení násobícího faktoru. Oba případy jsou však špatně, násobící faktor má být konstantní.

Metoda měření:

Při změně násobícího faktoru je výsledný proudový impuls zprostředkující míru velikosti energie absorbované ve scintilátoru ovlivněn touto změnou. Pozice fotopíku známého zdroje záření je potom ovlivněna směrem k nižším kanálům v případě poklesu násobícího faktoru a opačně směrem k vyšším v případě jeho zvýšení. Metoda vychází z porovnávání pozice píku zářiče při různé expozici detektoru. Expoziční příkon na detektor je snadné měnit a to změnou vzdálenosti zdroje od detektoru. Zde přibližně platí čtvercové pravidlo (přibližně proto, že používáme nebodový detektor v blízkém poli záření), tedy, že zdvojení vzdálenosti mezi detektorem a zdrojem vede ke čtyřnásobnému poklesu expozičního příkonu. Pokud pro vzdalování zdroje použijeme definované pozice a expoziční příkon normujeme tak, že maximální hodnota je rovna 100 procent je možné vytvořit index změny citlivosti polohy fotopíku na expozičním příkonu a porovnávat tak produkty a stanovit meze, kde tyto vyhovují.

Potřebné vybavení a pomůcky:

Scintilační detektory s fotonásobičem.

Spektrometr gama záření

Bodový zdroj ^{137}Cs

Provedení:

Detektor umístíme na podložku na označené místo. Zdroj záření přiložíme přímo na detektor. Registrujeme spektrum a stanovíme pozici píku. Zdroj oddálíme tak, aby se expoziční příkon snížil na polovinu. Opět registrujeme spektrum a pozici píku. Totéž i pro expoziční příkon čtvrtinový a osminový. Sleduje se, zda se mění pozice píku v závislosti na expozičním příkonu.

Experiment zopakujeme s jinými detektory.

Tepelná závislost scintilačního detektoru typu NaI/Tl a BGO

Světelný výtěžek scintilací v krystalu je závislý na teplotě. Pro každý typ krystalu je tato závislost jiná. Pro porovnání jsme vybrali dva nejběžnější typy a to krystal jodidu sodného dotovaného thaliem a krystal bismuthgermanatu. Smyslem zjišťování tepelné charakteristiky je naměřit skutečnou závislost světelného výtěžku na teplotě a pokusit se vytvořit korekční algoritmus, který by udržoval energetickou kalibraci přístroje nezávislou na teplotě. Teplotní závislost je jedna z nejvíce negativních vlastností scintilačních detektorů a její kompenzace je klíčem ke konstrukci špičkových spektrometrů.

Potřebné vybavení a pomůcky:

Scintilační detektory NaI/Tl a BGO s fotonásobiči.

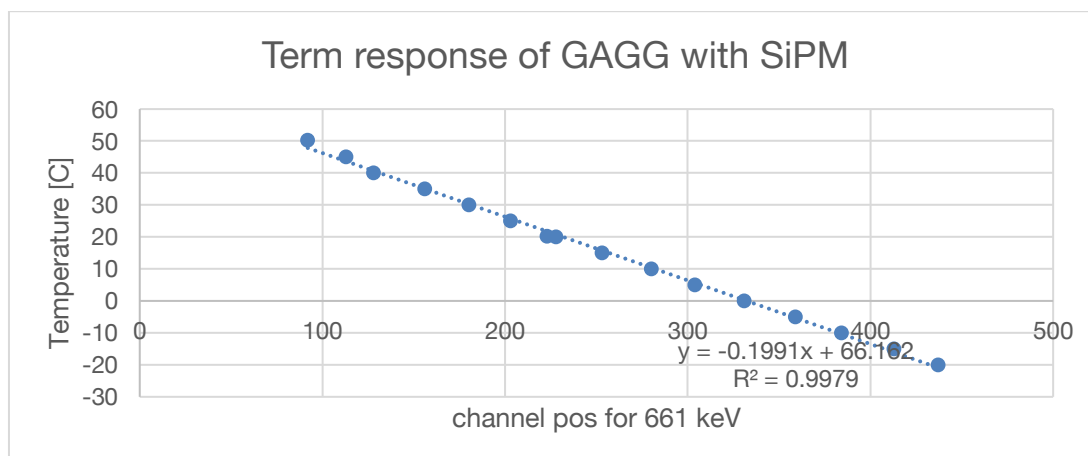
Spektrometr gama záření

Bodový zdroj ^{137}Cs

Termostat

Provedení:

Měření je náročné na čas. Pro každou teplotu je nutno vyčkat než se ustálí vnitřní teplota krystalu. V rozsahu od -20°C do 50°C se provede měření pozice fotopíku ve spektru. Z té se spočítá zesílení jako faktor okamžité pozice píku a pozice při teplotě, kdy byla pozice píku dosáhla nejvyššího kanálu ve spektru. Zde byl světelný výtěžek maximální. Závislost se vynese do grafu



Námět pro další studium: Otázka tepelné stability scintilačních krystalů je klíčová pro všechny spektrometrické systémy. Jak patrně, strmost odchylky píku je obrovská. Pro tepelnou kompenzaci se používá několik metod a technika není kompletně zvládnuta. Pro další studium se doporučují současné metody stanovení skutečné odchylky pomocí spekter přírodních radionuklidů.

Stanovení šumového prahu fotonásobiče a jeho závislost na teplotě

Pro dosažení nejvyšší citlivosti fotokatody fotonásobiče se používají soli s minimální excitací energií elektronů ve valenční slupce. Je to proto, aby co nejmenší energie světelného fotonu dokázala vyrazit elektron, který bude dále urychlován a násoben na dynodách. Potřebná energie nemusí být dodána jen fotonem světla, ale k uvolnění dojde i po absorpci energie tepelné, je to stejná forma, jen vlnová délka je jiná. To znamená, že fotonásobiče jsou citlivé na pracovní teplotu a dodávají do elektronického řetězce rušivý šum způsobený teplotou. Metody pro odstranění vlivu šumu jsou buď postaveny na jednoduché amplitudové diskriminaci pulsů s úrovní menší, než žádaná (omezení úrovně spodního diskriminátoru LLD), což má negativní dopad na energetický rozsah přístrojů. Další technikou je selekce detekovaných pulsů pomocí časové koincidence. Tak se dají oddělit šumové impulsy. Cenou je však nutnost uplatnění více fotonásobičů a mnohem komplikovanější design.

Potřebné vybavení a pomůcky:

Fotonásobič s děličem bez scintilačního krystalu
Spektrometr gama záření
Termostat

Provedení:

V rozsahu teplot od -20°C do 50°C se provede měření spekter impulsů z fotonásobiče bez scintilačního krystalu. Všechny zobrazené pulsy ve spektru jsou šumové. Hledá se pozice v kanálech ve spektru, kde již nejsou patrné žádné impulsy. Při známém zesílení trasy je potom možné stanovit skutečnou velikost diskriminačního prahu v milivoltech. Z grafické závislosti se potom určuje minimální hladina LLD pro konkrétní aplikace.