

Optické komunikácie

Optický prijímač

Prof. RNDr. Ing. Ján Turán, DrSc., KEMT FEI TU Košice

9.1 Klasifikácia a požiadavky návrhov optických prijímačov

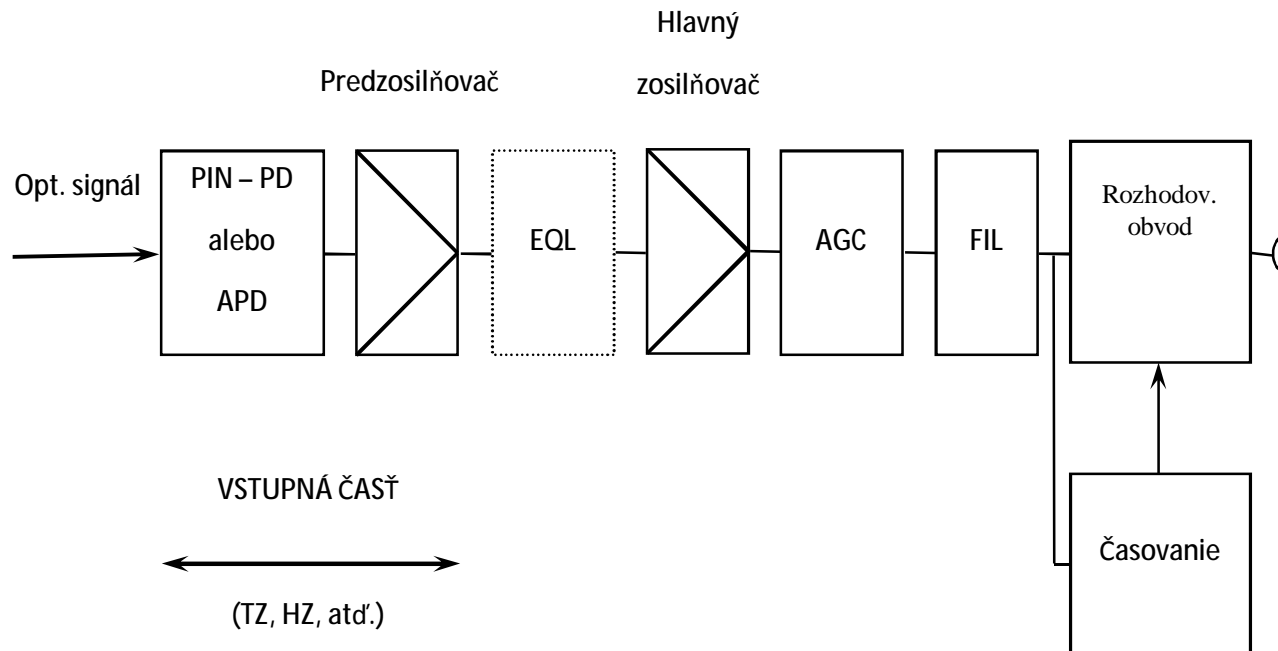
Systémové požiadavky pri návrhu optických prijímačov:

- n **Veľká citlivosť**
- n **Veľký dynamický rozsah**
- n **Priehľadnosť bitových rýchlostí**
- n **Nezávislosť od linkového kódu**
- n **Rýchly čas aktivácie zariadenia**

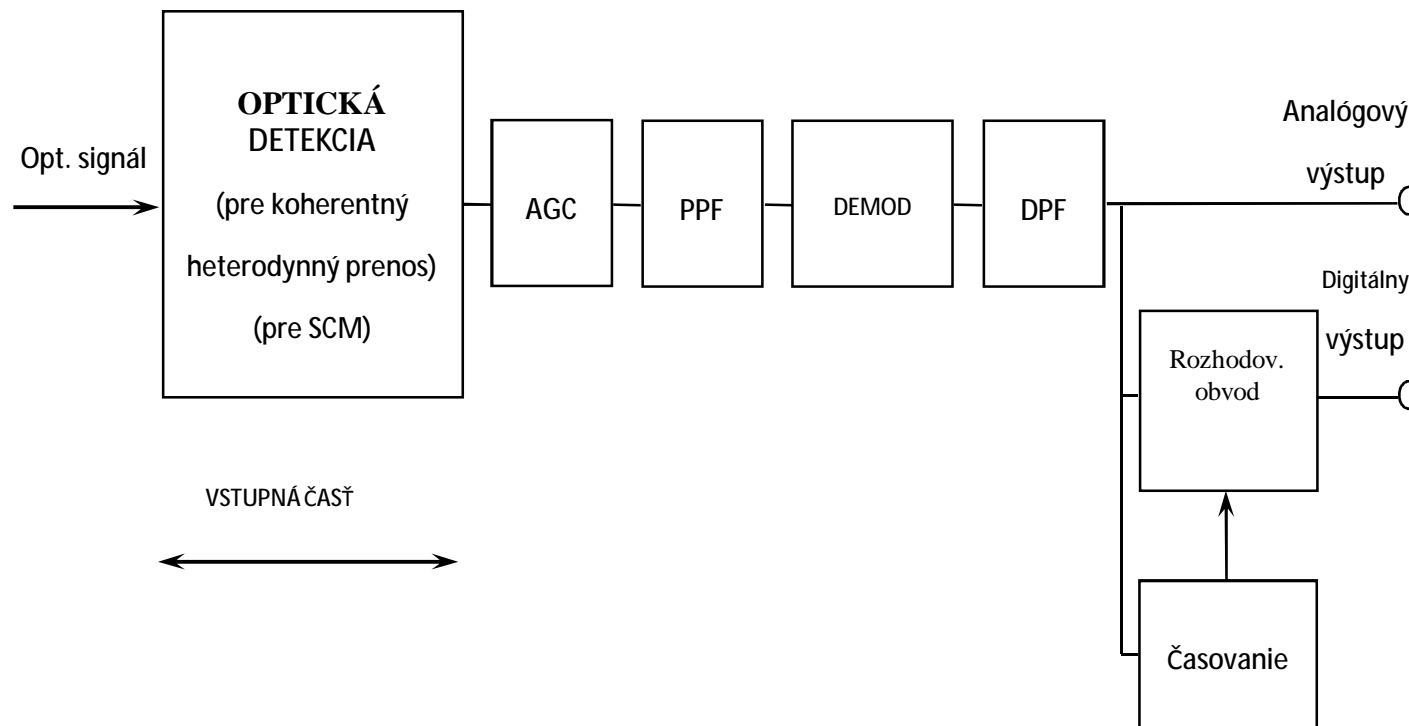
Pre niektoré systémy sa požaduje aj nezávislosť od vlnovej dĺžky v celom pásme

Konfigurácie optických prijímačov:

- n **Digitálny prenos v základnom pásme**
- n Pre **heterodynnú detekciu** v optických koherentných prenosových systémoch
- n Pre prenosové systémy **SCM**



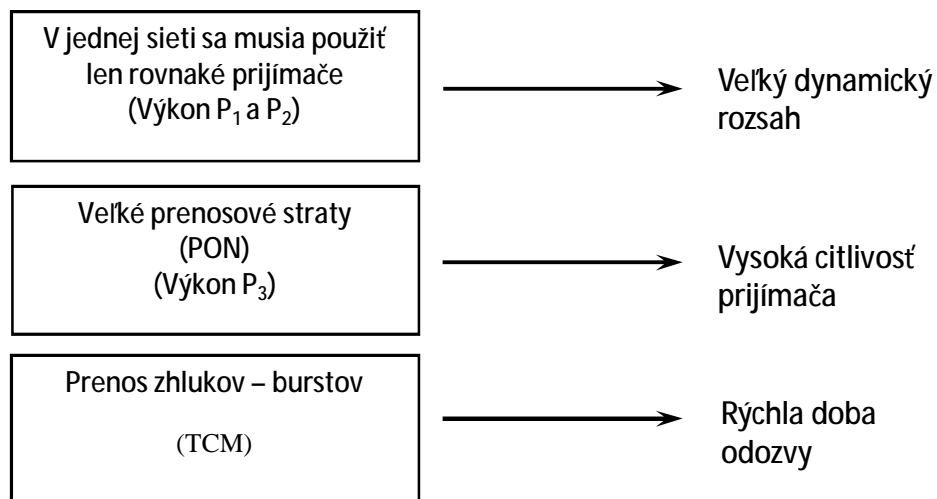
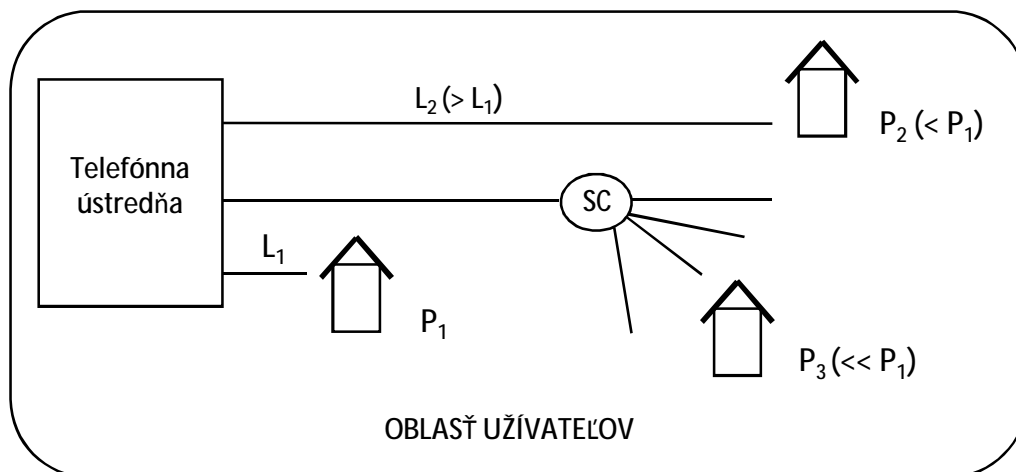
Obr.9.1 Optický prijímač pre digitálny prenos v základnom pásme.



Obr.9.2 Optický prijímač pre koherentný heterodynný, alebo SCM. prenos

Delenie **návrhov optických prijímačov** z hľadiska citlivosti, dynamického rozsahu a vstupnej časti:

- n **HZ - Vysokoimpedančný návrh** (High - Impedance Design)
 - n **TZ - Transimpedančný návrh** (Trans - Impedance Design)
 - n **LZ - Nízkoimpedančný návrh** (Low - Impedance Design)
 - n **RS - Rezonančný návrh** (Resonance - Type Design)
 - n **PK - Špičkový, maximálny návrh** (Peaking Design)
-
- n **TZ návrh** - **praktické** prenosové systémy a **digitálne** prenosové systémy v základnom pásme
 - n **RS návrh** - **koherentné** prenosové systémy
 - n **PK návrh** - prenosové systémy s **veľkou prenosovou rýchlosťou**



Obr. 9. 3 Optické prijímače v prístupových systémoch.

Požiadavky na optický prijímač:

- n **V prístupovej sieti sú užívatelia „roztrúsení“**
 - rozdielna prenosová dĺžka **L** medzi **TU** a užívateľom - rozdielny výkon **P**
- n **V PON sieti - vysoká citlivosť prijímačov**
- n **V TCM** - optické signály v tvare zhlukov - **bursty** - rýchly čas odozvy optických prijímačov
- n V digitálnom prenose je dôležitá nezávislosť bitov, aby bola splnená požiadavka rovnakého príjmu ktoréhokoľvek bitu

Požiadavky niektorých systémov:

- n **Priehľadnosť bitovej rýchlosti** - nie je dôležitá pre telekomunikačné systémy
 - typická pre prístupovú sieť, **LAN** resp. **LON** siete
- n **Nezávislosť od polarizácie** - dôležitá, pretože takmer všetky systémy používajú obyčajné jednovidové **OV** namiesto **OV** zachovávajúcich polarizáciu
- n **Nezávislosť vlnovej dĺžky** - nie je dôležitá pre telekomunikačné systémy

9.2 Návrh vstupných obvodov optického prijímača

9.2.1 Vysokoimpedančný návrh - HZ

Fotodióda PIN alebo APD ukončená veľkou impedanciou R_L

Tepelný šum záťažového rezistora R_L :

$$i_t^2 = \frac{4kTB}{R_L} \quad (9.1)$$

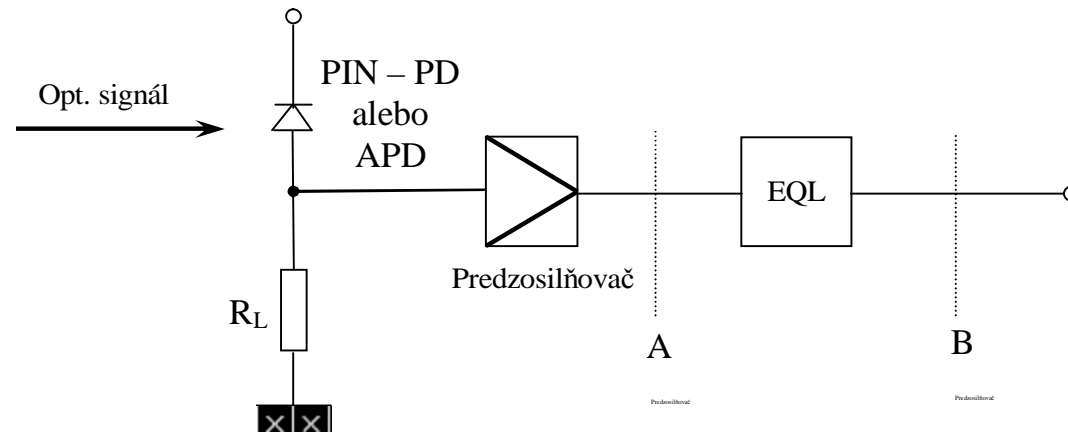
kde k je Boltzmannova konštanta

T je teplota

Impedancia R_L a celková kapacita C_T zapojená paralelne

- prenosová funkcia $Z(f)$:

$$Z(f) = \frac{V}{I} = \frac{AR_L}{1 + j2\pi f R_L C_T} \quad (9.2)$$



Obr. 9. 4 Vysokoimpedančný (HZ) návrh optického prijímača.

Z Thomsonovho vzťahu medzná frekvencia orezania:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot R_L \cdot C_T} \quad (9.3)$$

celková kapacita zahŕňa kapacitu C_t na **PD PIN** alebo **APD**, vstupnú kapacitu C_a predzosilňovača a iné parazitné kapacity C_s

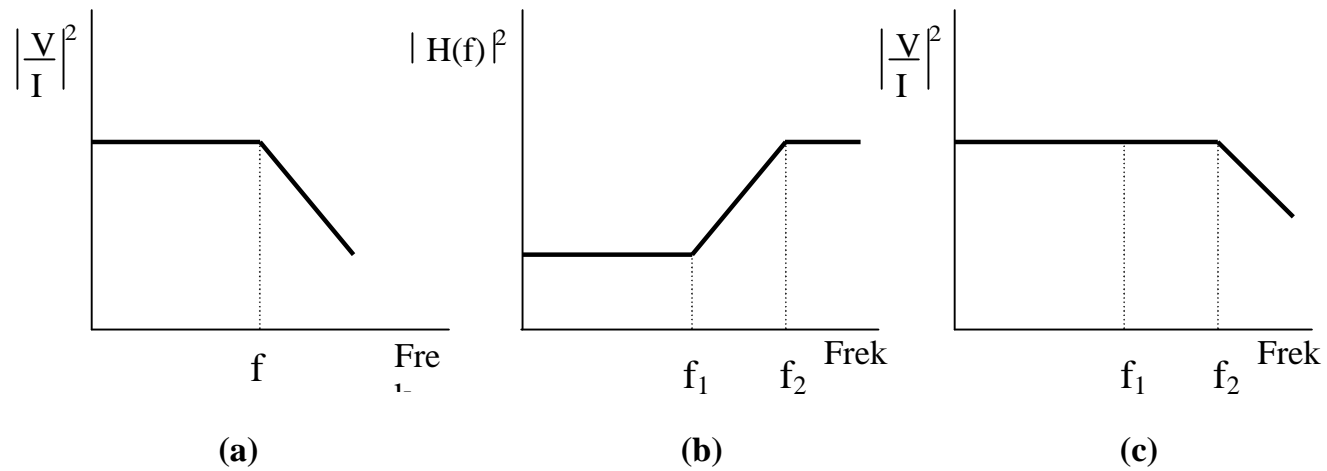
- n Ak sa R_L zvyšuje, f_c klesá - potrebný **ekvalizátor EQL** (kompenzácia úzkej šírky pásma)

Prenosová funkcia RC ekvalizátora má nulu pri f_1 :

$$f_1 = \frac{1}{2\pi \cdot R_1 \cdot C_1} \quad (9.4)$$

a pól pri frekvencii f_2 :

$$f_2 = \frac{R_1 + R_2}{2\pi \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot C_1} \quad (9.5)$$



Obr. 9. 5 Princíp ekvalizátora v **HZ** návrhu: (a) výstup z predzosilňovača (bod A),
 (b) frekvenčná charakteristika ekvalizátora,
 (c) výstup z **EOL** (bod B).

Ak je **ekvalizácia slabá**, prípadne žiadna, vzniká:

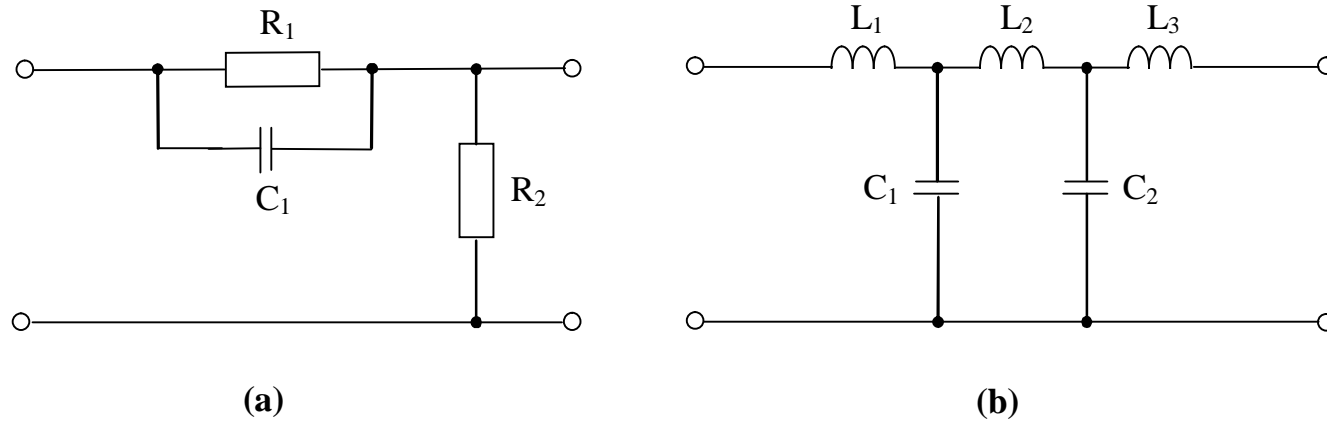
- n **Intersymbolová interferencia**
- vzájomné prekrytie susedných pulzov signálu

Typy filtrov, ktoré využívajú obvody zapojené ako ekvalizátory:

- n **Jednoduchý RC filter**
- n **Thomsonov filter**
- n **Transverzálny filter**
- n **Kalmanov filter**

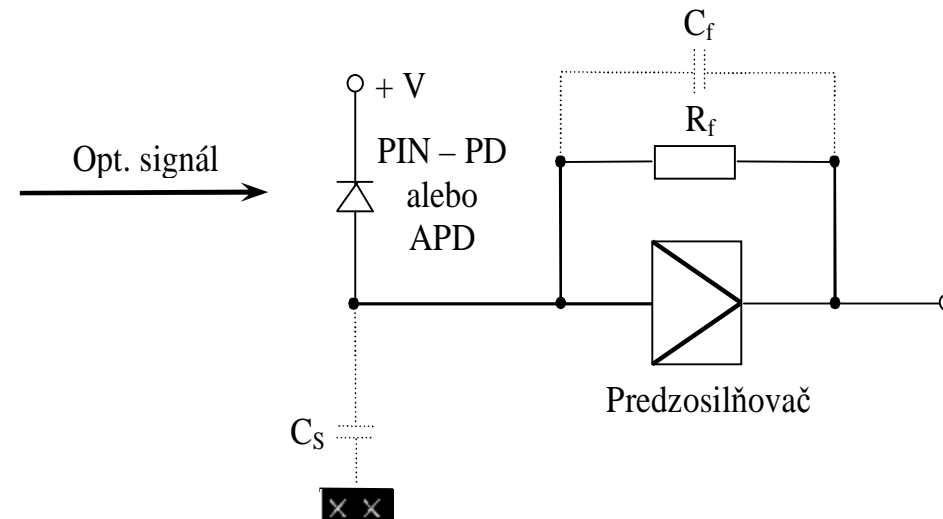
Vlastnosti HZ:

- n **Najvyššia citlivosť prijímača**
- n **Malý dynamický rozsah**



Obr.9. 6 Príklady ekvalizátorov: (a) **EQL** s **RC** filtrom,
 (b) **EQL** s Thomsonovým filtrom.

9.2.2 Transimpedančný návrh - TZ

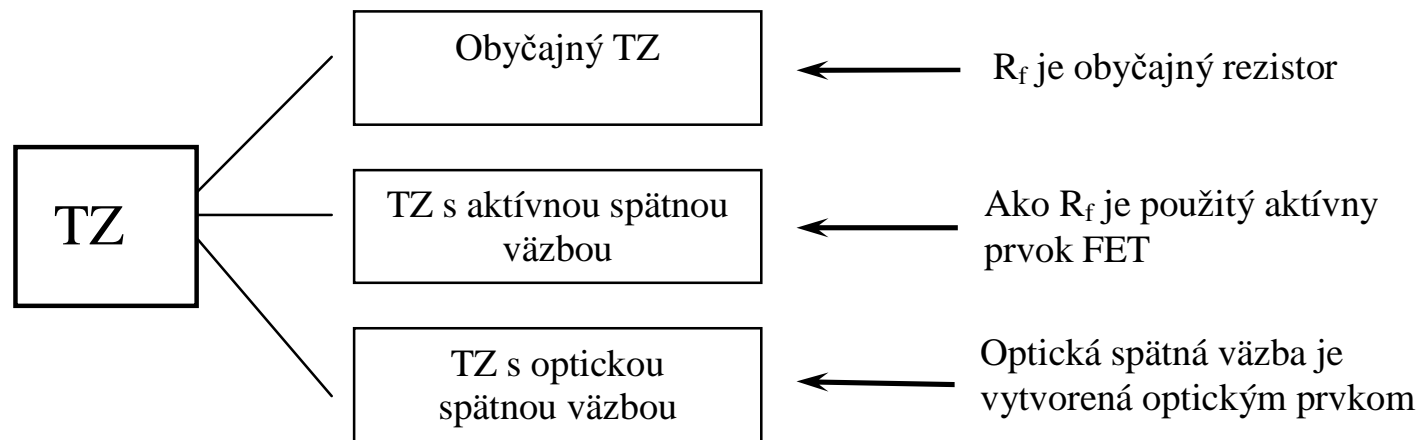


Obr. 9. 7 Transimpedančný (TZ) návrh.

Klasifikovaný podľa **typu spätnej väzby**

Tri typy TZ návrhov:

- ✓ **Obyčajný TZ návrh**
- spätná väzba vytvorená pomocou rezistora R_f
- ✓ **Návrh s aktívnou spätnou väzbou**
– spätná väzba vytvorená aktívnym prvkom
- ✓ **Návrh s optickou spätnou väzbou**
- využíva optickú spätnoväzobnú slučku



Obr. 9.8 Rozdelenie TZ návrhov.

9.2.2.1 Obyčajný TZ návrh

n **Predzosilňovač má vysokú vstupnú impedanciu**

Prenosová funkcia $Z(f)$:
$$Z(f) = \frac{R_f}{1 + j2\pi f R_f \left(C_f + \frac{C_T}{A} \right)} \quad (9.6)$$

$$Z(f) = R_f + j2\pi f \left(C_f + \frac{C_T}{A} \right)$$

Frekvencia orezania:

$$f_c = \frac{A}{2\pi R_f (A C_f + C_T)} \quad (9.7)$$

kde:

- n C_T je celková kapacita, ktorá zahŕňa kapacitu C_t **PD PIN** alebo **APD**, vstupnú kapacitu C_a a iné prechodové kapacity C_s
- n A je zisk predzosilňovača

Ak A nadobúda veľkú hodnotu, potom frekvencia f_c je:

$$f_c = \frac{1}{2pfR_f C_f} \quad (9.8)$$

Tepelný šum rezistora R_f :

$$\langle i_t^2 \rangle = \frac{4kTB}{R_f} \quad (9.9)$$

Vlastnosti:

- n **Veľká citlivosť prijímača** - návrh s veľkou hodnotou R_f
- n R_f (**TZ**) < R_L (**HZ**) - zníženie citlivosti prijímača v **TZ** návrhu oproti **HZ** návrhu

9.2.2.2 Návrh s aktívnou spätnou väzbou

- n **Využíva aktívny prvok namiesto obyčajného rezistora R_f**
- n Rezistor s veľkou hodnotou má relatívne veľkú parazitnú kapacitu C_f
- n Zväčšeniu parazitnej kapacity C_f zabránime realizáciou aktívnej spätnej väzby

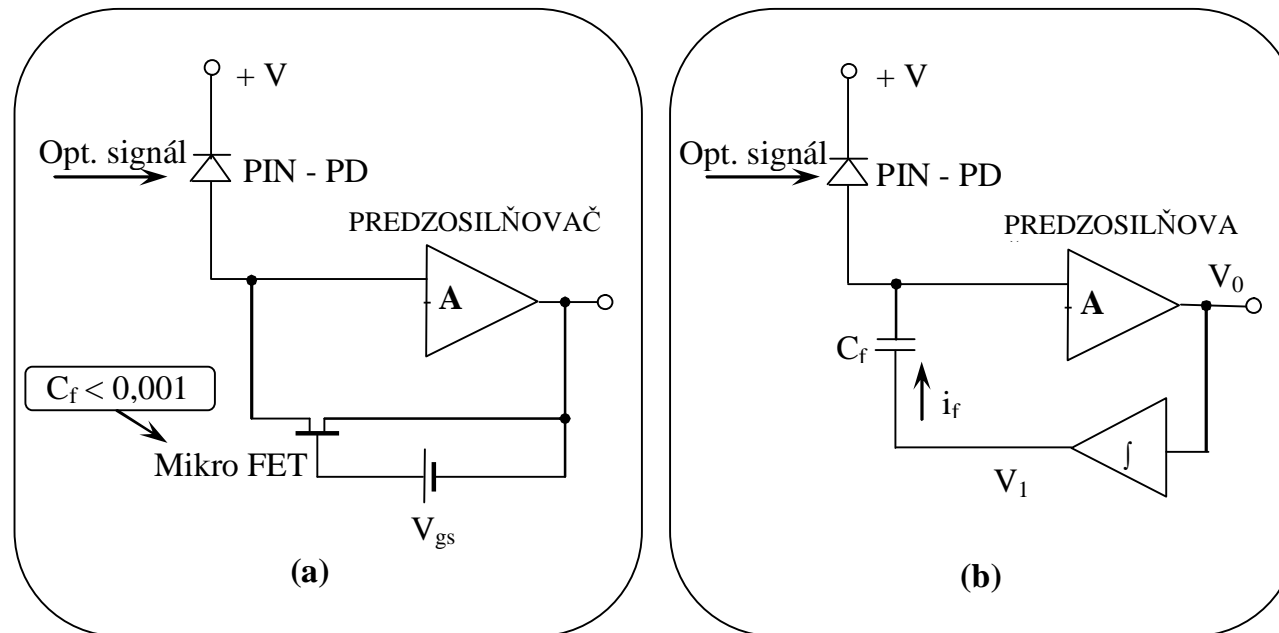
Spätnoväzobný prúd I_f

$$I_f = C_f \left(\frac{dV_1}{dt} \right) = C_f \left(\frac{d \int V_0 dt}{dt} \right) = C_f V_0 \quad (9.10)$$

kde:

V_1 je napätie

Výraz (9.10) vyjadruje kombináciu kapacity C_f a integrátora, ktorý má funkciu ideálneho rezistora



Obr. 9.9 TZ návrh s aktívnou spätnou väzbou: (a) s využitím mikro **FET**,
(b) s využitím integrátora.

9.2.2.3 Návrh TZ s optickou spätnou väzbou

- n Namiesto elektrickej spätnoväzobnej slučky sa používa slučka s využitím optického signálu, ktorá vylučuje rezistor R_f - vysoká citlivosť
- n C_f je odstránená - väčšia šírka pásma
- n Väčšia hodnota prúdu v **SV** získaná z malého $U_{výst}$ - zväčšenie dynamického rozsahu

Spätnoväzobný prúd i_f generovaný PIN detektorom z prijatého spätnoväzobného optického signálu:

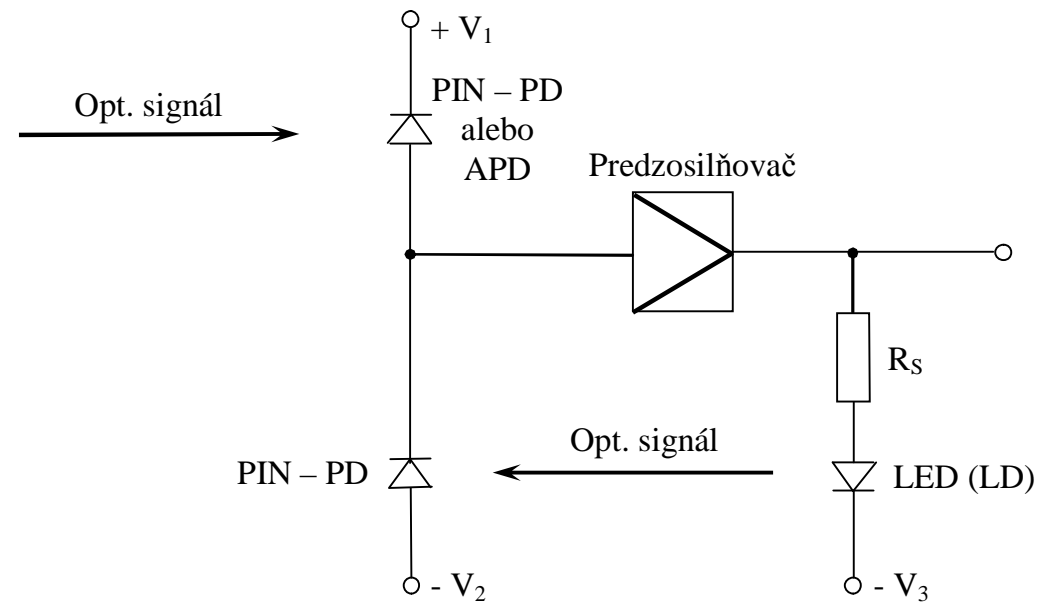
$$i_f = K i_{LED} \quad (9.11)$$

kde:

n i_{LED} je prúd z **LED** (v prípade laserovej diódy sa jedná o i_{LD})

n K je **spätnoväzobný faktor**

(zahŕňa účinnosť **LED** a **PD PIN** v spätnoväzobnej slučke)



Obr. 9.10 Návrh s optickou spätnou väzbou.

Prenosová funkcia:

$$Z(f) = \frac{R_s}{K} = \frac{1}{1 + \frac{j2\pi f R_s C_T}{AK}} \quad (9.12)$$

kde:

n R_s je rezistor

n C_T je celková kapacita

Ekvivalentná spätnoväzobná hodnota rezistora R_f pri podmienke malej frekvencie:

$$(R_f)_{eq} = \frac{R_s}{K} \quad (9.13)$$

Tepelný šum rezistora R_s :

$$\langle i_t^2 \rangle_{LED} = \frac{4kTB}{R_s} \quad (9.14)$$

tento šum je zavedený do obvodu spätnej väzby

Využitím (9.11) je **tepelný šum:**

$$\langle i_t^2 \rangle = \frac{4kTK^2B}{R_s} \quad (9.15)$$

Zavedením ekvivalentnej spätnoväzobnej rezistivity
(R_f)_{eq} - **šum obyčajného TZ návrhu:**

$$\langle i_t^2 \rangle_{eq} = \frac{4kTB}{(R_f)_{eq}} = \frac{4kTKB}{R_s} \quad (9.16)$$

- n Malá hodnota parametra K - tepelný šum návrhu s optickou spätnou väzbou je menší o K oproti obyčajnému **TZ** návrhu
- **vysoká citlivosť prijímača**

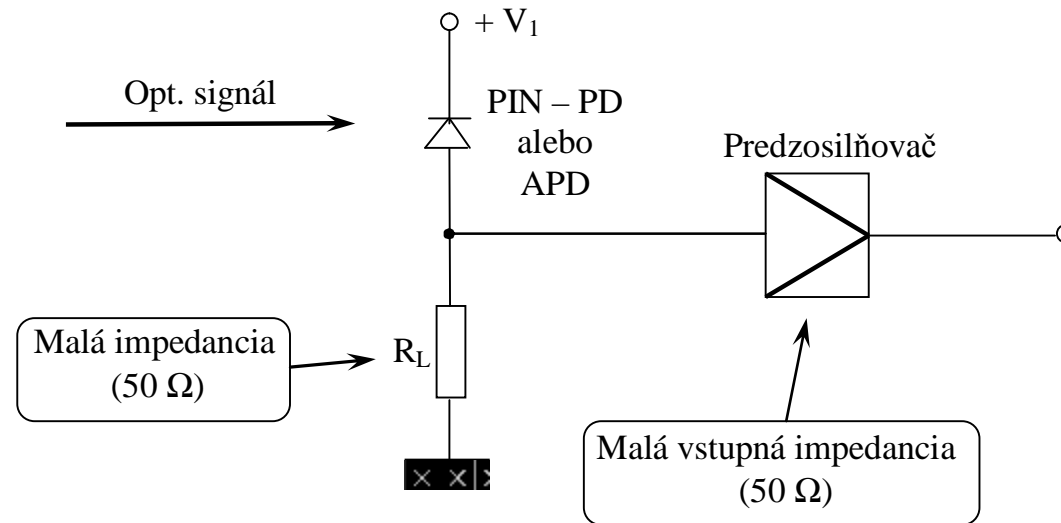
9.2.3 Návrh s malou impedanciou – LZ návrh

- ✓ Oproti **TZ** alebo **HZ** návrhu je rozdielny
- ✓ **Zaťažovacia impedancia R_L má malú hodnotu**
- ✓ Vyznačuje sa **jednoduchosťou a nízkou cenou**

Potrebná šírka pásma sa musí dosiahnuť bez obvodu ekvalizátora
- **preto pre R_L musí platiť podmienka:**

$$R_L \leq \frac{1}{2pf_c C_T} \quad (9.17)$$

- n Medzná frekvencia f_c zodpovedá hodnote prenosovej rýchlosti (B) pre digitálny prenos.
- n R_L má malú hodnotu - tepelný šum je relatívne veľký - **LZ** návrh dosahuje nižšiu citlivosť ako **HZ**, **TZ** návrh
- n **Veľká šírka pásma a veľký dynamický rozsah**



Obr. 9.11 LZ návrh.

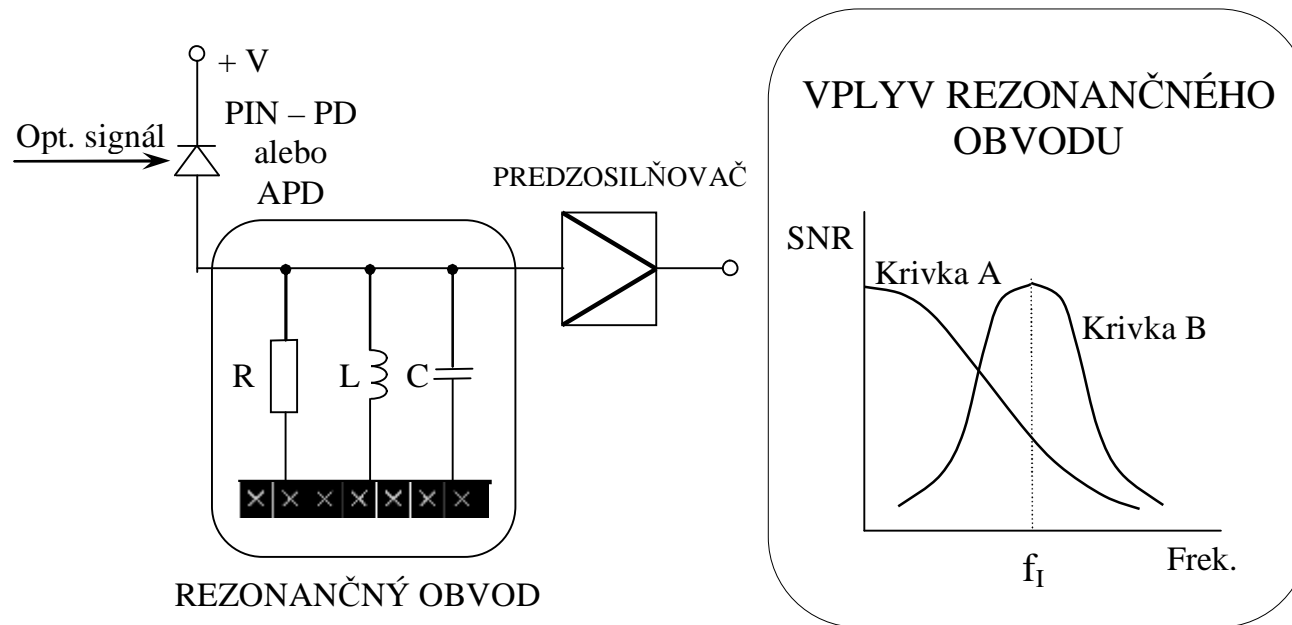
9.2.4 Návrh rezonančného typu pre koherentný prenos

- n Využíva sa v **koherentných heterodynných prenosových systémoch**. Pre heterodynný prenos sa požaduje veľký pomer **S/N** iba v okolí subnosnej frekvencie, kde do obvodu je vložený ladiaci (rezonančný) obvod
- n Je podobný konvenčnému heterodynnému prijímaču a môže sa využívať v optických **SCM** prenosových systémoch

9.2.5 Návrh s indukčnou maximalizáciou

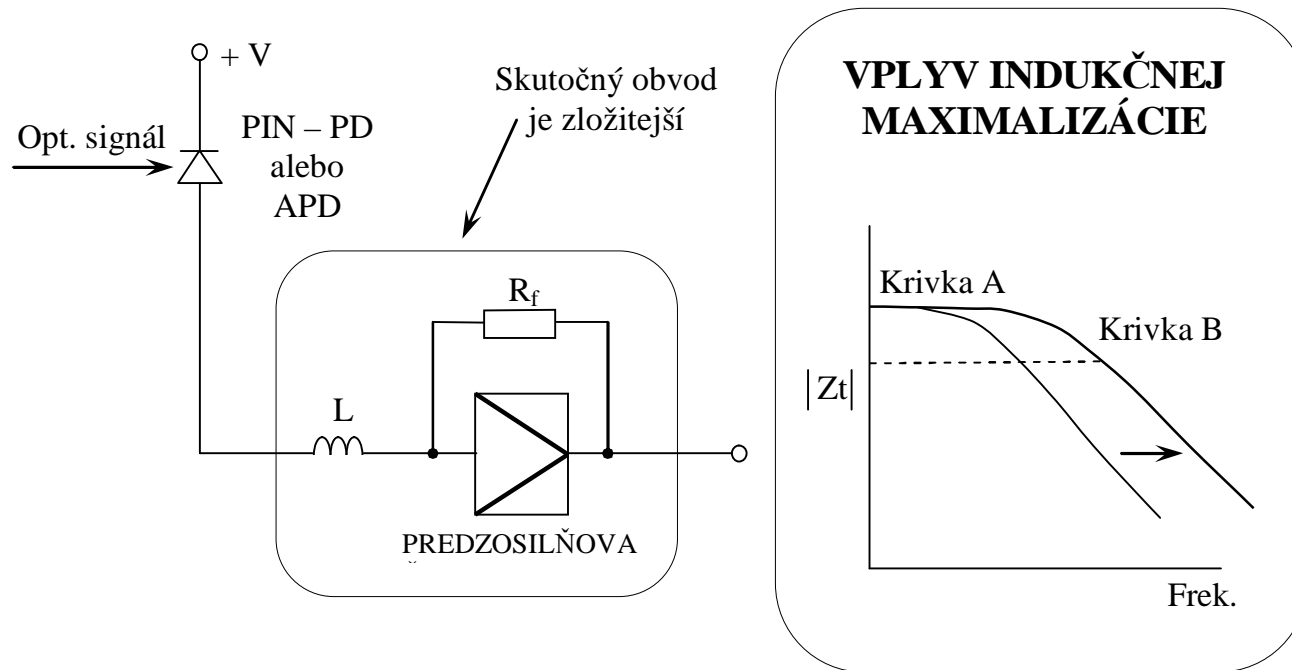
- n Vyvinutý pre návrhy konvenčných elektrických zosilňovačov a je ho možné aplikovať ako **prijímač s veľkou šírkou pásma**
- n Celková kapacita C_T znižuje šírku pásma vstupného obvodu, v dôsledku znižovania tohto efektu sa návrh vyšetroval pre analógový prenos a prenos s veľkou prenosovou rýchlosťou
- n Zväčšuje šírku pásma o 20 ÷ 50%

Optické komunikácie



Krivka A - bez rezonančného obvodu
Krivka B – rezonančný obvod s frekvenciou f_{IF}

Obr. 9.12 Návrh prijímača rezonančného typu.



Krivka A - bez efektu maximalizácie

Krivka B – použitie indukčnej maximalizácie

Obr. 9.13 Návrh prijímača s indukčnou maximalizáciou.

9.3 Porovnanie návrhov optických prijímačov

PRIJÍMAČ	KONFIGURÁCIA	VÝHODY	NEVÝHODY
LZ	malá impedancia 50	najväčší dynamický rozsah veľká šírka pásma	malá citlivosť
HZ	vysoká impedancia	najväčšia citlivosť	úzky dynamický rozsah precízny návrh EQL
TZ	spätná väzba	veľký dynamický rozsah	
Rezonancia	rezonančný prijímač pre heterodynný prenos	zlepšenie S/N pre medzifrekvenciu	
Indukčná maximalizácia		veľká šírka pásma vrchol (pre vysokú prenosovú rýchlosť)	

- n **Dynamický rozsah** je interval, v ktorom prijímač môže obe výkonové úrovne vstupného signálu detekovať bez chyby
- n **Horná hranica** rozsahu pre vyššiu úroveň optického výkonu signálu je určená **saturačným napätím V_{sat}**

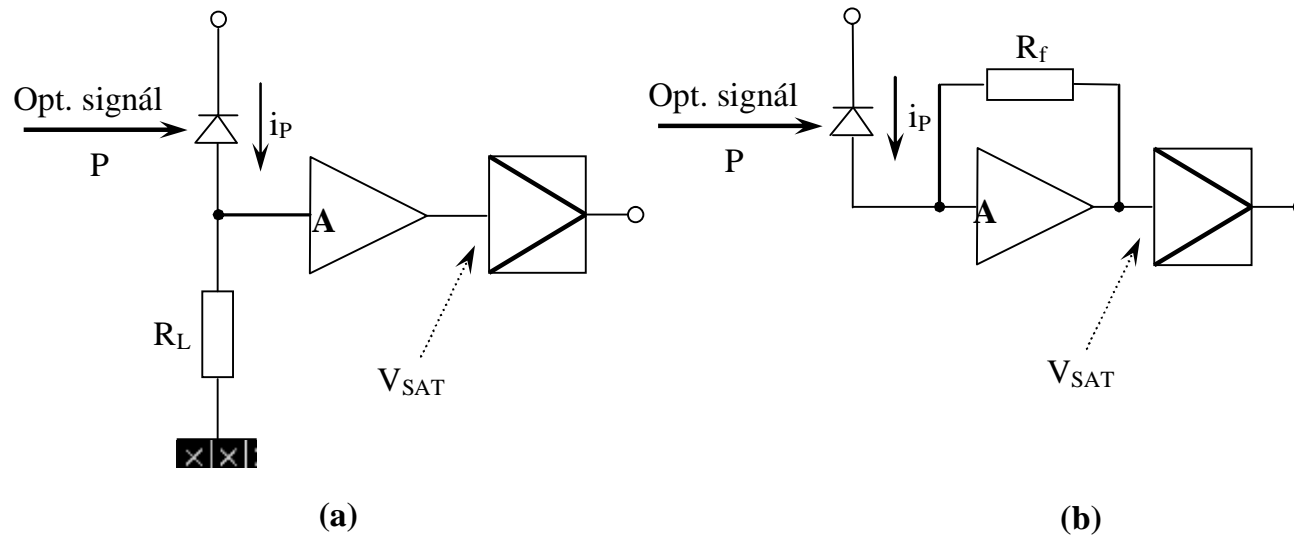
Prúd i_p je:

$$i_p = RP \quad (9.18)$$

kde:

R je citlivosť

P je vstupný optický výkon



Obr. 9.14 Citlivosť a dynamický rozsah: (a) HZ alebo LZ návrh, (b) TZ návrh.

Saturačné napätie V_{sat} :

$$V_{\text{sat}} = A i_p R_L = ARPR_L \quad (\text{LZ a HZ návrh}) \quad (9.19)$$

$$V_{\text{sat}} = i_p R_f = RPR_f \quad (\text{TZ návrh}) \quad (9.20)$$

Maximálny prijatý výkon P_{sat} :

$$P_{\text{sat}} = \frac{V_{\text{sat}}^2}{4RR_L} \quad (\text{LZ a HZ návrh}) \quad (9.21)$$

$$P_{\text{sat}} = \frac{V_{\text{sat}}^2}{RR_L} \quad (\text{TZ návrh}) \quad (9.22)$$

Zhrnutie:

- n V **HZ** návrhu hodnota R_L nadobúda veľkú hodnotu - P_{sat} je malý - väčšia citlivosť - menší dynamický rozsah
- n Vzťah medzi citlivosťou a dynamickým rozsahom je totožný aj pre **TZ** návrh
- n V **LZ** návrhu R_L nadobúda malú hodnotu 50Ω - najväčší dynamický rozsah a najmenšia citlivosť
- n Obyčajné prenosové digitálne systémy - **TZ** návrhy - citlivosť a šírka dynamického rozsahu nie sú zlé
- n Pre niektoré systémy - **LZ** návrhy - jednoduchosť, nízka cena - nie, ak je potrebná veľká citlivosť prijímačov

9.4 Automatické riadenie zisku a extrakcia časovania

- n Hoci návrh vstupného obvodu je najdôležitejší pri návrhu optického prijímača, potrebná je aj technológia **automatického riadenia zisku - AGC**
- n Využívajú sa metódy určené pre konvenčné elektrické prijímače, alebo špeciálne vyvinuté pre optické prijímače. Podobne sa technológie extrakcie časovania, vyvinuté pre obyčajné elektrické prijímače aplikujú na optické prijímače v digitálnych prenosových systémoch

Automatické riadenie zisku – AGC

- n Zapojenie **AGC** pre **PIN - PD** prijímač je rovnaké ako pre obyčajný elektrický prijímač. Špička výstupného napätia je detekovaná detektorom špičky a detekované napätie riadi zisk napätím riadeného zosilňovača.
- n Zapojenie **AGC APD** prijímača je špeciálne pre optický prijímač
- n **Využívajú sa dva typy AGC:**
 - **Obyčajný elektrický obvod AGC**
 - **Budiacim napätím riadený detektor APD**

Extrakcia časovania

Technológie extrakcie časovania:

- n Rezonančná metóda využívajúca niekoľko pamäťových obvodov
- n Metóda fázového závesu PLL
- n Metóda digitálneho vzorkovania

Výber metódy je podmienený charakteristikou prenášaných signálov

Charakteristika prenášaného signálu je:

- n Metóda prenosu, t.j. informácie sú prenášané súvisle, alebo v zhlukoch
- n Počet prechodov zo stavu „0“ do stavu „1“ (a naopak) počas jedného symbolu
- n Stabilita
- n Cena

Degradačné faktory

Niektoré faktory sa nedajú odstrániť len návrhom alebo výrobou prijímača, pretože závisia od parametrov systému:

- n Pridelená optická frekvencia
- n Určený linkový kód

Degradácia závisí od parametrov zariadenia:

- n Šírka spektrálnej čiary lasera
- n Hodnota RIN
- n Charakteristika filtra

Je dôležité poznať aj pôvod degradácie