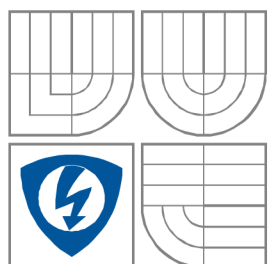


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## MĚŘENÍ PARAMETRŮ OBRAZOVÝCH SNÍMAČŮ CCD

MEASUREMENT OF IMAGE CCD SENSORS PARAMETERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

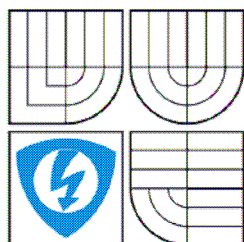
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

ADAM PAVELKA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

prof. Ing. VÁCLAV ŘÍČNÝ, CSc.

BRNO, 2009



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Elektronika a sdělovací technika

**Student:** Adam Pavelka  
**Ročník:** 3

**ID:** 98400  
**Akademický rok:** 2008/2009

**NÁZEV TÉMATU:**

## Měření parametrů obrazových snímačů CCD

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Definujte soubor základních parametrů řádkových i obrazových snímačů CCD používaných v TV kamerách. Navrhněte metodiku a uskutečňte ucelený soubor měření těchto parametrů, včetně odhadu relevance výsledků. Diplomová práce má obsahovat:

- návrh a definice souboru parametrů včetně metodiky jejich měření,
- měření parametrů dvou vybraných typů obrazových snímačů CCD a jejich grafická interpretace,
- zhodnocení výsledků měření.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] NUHRMAN, D. Sensor-Praxis. Mnichov, Franzis-Verlag GmbH, 1991
- [2] ŘÍČNÝ, V. Videotechnika. Skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2006.
- [3] ŘÍČNÝ, V. Measurement of the geometrical distortions of TV cameras. In Proceedings of the International Scientific Conference Radioelektronika 97. Bratislava: FEI TU Bratislava, 1997

**Termín zadání:** 9.2.2009

**Termín odevzdání:** 5.6.2009

**Vedoucí práce:** prof. Ing. Václav Říčný, CSc.

**prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida**  
Předseda oborové rady

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá obrazovými (B)CCD snímači, které převádí světelné záření dopadající na světlocitlivou vrstvu snímače na obrazový signál, seznamuje s principem jejich činnosti a uvedením základních parametrů (B)CCD snímačů.

U základních parametrů je v projektu diskutována problematika jejich měření a možnost určení parametrů k nim ekvivalentních v dostupných laboratorních podmínkách. Ke každému parametru jsou uvedeny teoretické předpoklady či výrobci udávané hodnoty, podmínky ovlivňující měření daného parametru, určení metodiky měření v laboratorních podmínkách, seznam použitých měřicích přístrojů, zhodnocení naměřených výsledků a určení míry jejich relevance vzhledem k teoretickým předpokladům.

### **Klíčová slova:**

(B)CCD snímače, obrazové snímače, princip (B)CCD snímačů, parametry (B)CCD snímačů, převodní charakteristika, spektrální citlivost, modulační přenosová funkce, zbytkový signál za tmy, doba náběžné a sestupné hrany.

## **ABSTRACT**

The Bachelor's thesis deals with image CCD sensors. These transform the light radiation falling on the photosite array into the picture signal. The project describes the principals of their work and introduces the basic parameters of the sensors.

The project further deals with questionability of basic parameters measurement and possibility to define equivalent parameters measurable in the laboratory conditions. Following characteristics are listed to every parameter theoretical values or values presented by the producers, conditions influencing the measurement, methodology of measurement in the laboratory conditions, list of used measuring tools, evaluation of the measured values and estimated rate of relevancy towards the theoretical preconditions.

### **Key words:**

(B)CCD sensors, image sensors, principals of (B)CCD sensors, parameters of the (B)CCD sensors, transfer characteristic, spectral sensitivity, modulation transfer function, dark signal, rise and fall time.

## **Bibliografická citace**

PAVELKA, A. *Měření parametrů obrazových snímačů CCD*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 44 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Václav Říčný, CSc.

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Měření parametrů obrazových snímačů CCD jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 5. června 2009

.....  
podpis autora

## Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Václavu Říčnému, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 5. června 2009

.....  
podpis autora

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>8</b>
<b>1.1</b>	<b>CCD snímače – historie.....</b>	<b>8</b>
<b>1.2</b>	<b>CCD snímače – princip činnosti.....</b>	<b>9</b>
1.2.1	Řádkové CCD snímače .....	11
1.2.2	Plošné CCD snímače .....	12
<b>2</b>	<b>PROBLEMATIKA MĚŘENÍ PARAMETRŮ SNÍMAČE ZABUDOVANÉHO V TV KAMERĚ.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>Vliv vlastností optické soustavy (objektivu).....</b>	<b>14</b>
<b>2.2</b>	<b>Vliv elektronického zpracování obrazového signálu v kameře.....</b>	<b>14</b>
<b>2.3</b>	<b>Vliv vlastností osvětlovacího zdroje.....</b>	<b>14</b>
<b>3</b>	<b>PARAMETRY OBRAZOVÝCH CCD SNÍMAČŮ .....</b>	<b>15</b>
<b>3.1</b>	<b>Citlivost obrazových CCD snímačů.....</b>	<b>15</b>
3.1.1	Měření plošného snímače pomocí regulovatelného světelného zdroje.....	15
3.1.2	Měření plošného snímače pomocí obrazce ve stupních šedi.....	18
3.1.3	Měření řádkového snímače pomocí regulovatelného světelného zdroje .....	19
3.1.4	Použité měřicí přístroje, vybavení.....	21
3.1.5	Zhodnocení výsledků .....	21
<b>3.2</b>	<b>Spektrální citlivost.....</b>	<b>22</b>
3.2.1	Problematika zdroje osvětlení a barevných filtrů.....	23
3.2.2	Metodika měření plošného CCD snímače.....	23
3.2.3	Metodika měření řádkového CCD snímače .....	24
3.2.4	Použité měřicí přístroje, vybavení.....	25
3.2.5	Zhodnocení výsledků .....	26
<b>3.3</b>	<b>Rozlišovací schopnost.....</b>	<b>26</b>
3.3.1	Modulační přenosová funkce .....	27
3.3.2	Zkušební obrazce.....	28
3.3.3	Metodika měření plošného CCD snímače.....	28
3.3.4	Metodika měření řádkového CCD snímače .....	30
3.3.5	Použité přístroje, vybavení.....	32
3.3.6	Zhodnocení výsledků .....	32
<b>3.4</b>	<b>Zbytkový signál za tmy .....</b>	<b>33</b>
3.4.1	Metodika měření plošného snímače .....	34
3.4.2	Metodika měření plošného snímače.....	35
3.4.3	Použité měřicí přístroje, vybavení.....	36
3.4.4	Zhodnocení výsledků .....	37
<b>3.5</b>	<b>Měření nástupných a sestupných hran.....</b>	<b>37</b>
3.5.1	Metodika měření plošného CCD snímače.....	38
3.5.2	Metodika měření řádkového CCD snímače .....	39

3.5.3	Použité přístroje, vybavení.....	40
3.5.4	Zhodnocení výsledků .....	40
<b>4</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>41</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY .....</b>	<b>42</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....</b>	<b>43</b>

# 1 Úvod

Cílem převážně experimentálně zaměřené bakalářské práce je definovat soubor parametrů obrazových CCD (plošných a řádkových) snímačů, pro které by bylo možno stanovit metodiku měření s dostupným laboratorním vybavením. Dále je třeba pro určené parametry zjistit závislost na těch vnějších vlivech, které významně ovlivňují vlastnosti opto-elektronické transformace – např. teplotě, době integrace aj. U většiny parametrů se jedná o poměrně náročná optická a elektronická měření, která jsou právě limitována dostupným laboratorním vybavením.

V bakalářské práci mají být změřeny a vyhodnoceny parametry dvou obrazových snímačů CCD. Prvním z nich je plošný obrazový snímač CCD ICX429ALL firmy SONY. U tohoto snímače byla situace komplikována skutečností, že pro daný typ snímače nebyla k dispozici vývojová měřicí deska výrobce a všechna měření bylo proto nutno uskutečňovat prostřednictvím signálových výstupů černobílé televizní kamery MINTRON MTV-12W1C, ve které byl snímač zabudován. Součástí projektu byl tedy i návrh potřebné metodiky, která by umožnila zjednodušená měření obrazového signálu na dostupném výstupu kamery, jejichž výsledky by byly alespoň částečně relevantní. Míru jejich relevance bylo možno posoudit např. srovnáním s některými dostupnými údaji výrobce. Tímto je možné zhodnotit také oprávněnost některých zjednodušujících předpokladů i správnost použité metodiky měření.

Druhým měřeným obrazovým snímačem je řádkový snímač CCD151 firmy Fairchild. K tomuto snímači byla dostupná i vývojová měřicí deska, čehož je v projektu s výhodou využito. Po určitých úpravách metodiky měření lze u tohoto řádkového snímače stanovit a naměřit stejný soubor parametrů, jako u plošného snímače v televizní kameře MINTRON. V tomto případě však parametry neovlivňuje optická ani elektronická soustava a měřený obrazový signál přímo odpovídá výstupnímu obrazovému signálu snímače. Navzdory odlišnosti by se však naměřené výsledky parametrů obou obrazových snímačů neměly výrazně lišit. Na základě tohoto předpokladu tedy bude možno stanovit správnost a přesnost obou použitých metodik měření jejich srovnáním.

## 1.1 CCD snímače – historie

Historie obrazových snímačů CCD (Charge Coupled Device) je poměrně mladá. Jak uvádí zdroj [1], za vynálezce CCD snímačů jsou považováni Willard Boyle a George E. Smith z Bellových laboratoří. Jejich vynález se v roce 1969 váže spíše k vývoji určitého typu paměťového registru, který ve své podstatě pracuje jako CCD snímač bez přístupu světla. CCD snímače nejsou vlastně ničím jiným, než posuvné registry vystavené působení světla.

Podle [1] prototyp prvního digitálního fotoaparátu, používajícího CCD snímač, sestrojila v roce 1981 firma SONY. Aparát pod názvem MAVICA (Magic Video Camera) měl rozlišení 290 000 pixelů (pixel – z anglického Picture Element značí elementární světlocitlivý bod snímače) uspořádaných v obdélníkové matici. Výstup se zobrazoval na televizoru nebo tiskl na speciální tiskárně dodávané k fotoaparátu.

S rozvojem informačních technologií počátkem 90. let minulého století došlo i k masivnějšímu rozvoji digitálních zařízení. Nejen díky miniaturizaci elektronických součástek se dosahuje vyšších rozlišení snímačů. V dnešní době se stávají standardem digitální zařízení s tzv. Full HD (High Definition) technologií. Snímače v těchto zařízeních mají rozlišení i několik desítek Mpixelů. K efektivnímu zobrazení takto zaznamenaného obrazu je však nutné použít i odpovídající HD zobrazovače.



Hlavními výhodami CCD snímačů jsou nízký příkon, malé rozměry, CCD snímače mají velmi malé geometrické zkreslení, velký spektrální rozsah a velkou citlivost. Nevýhodou však zůstává především teplotní závislost, protože se jedná o polovodičové součástky.

## 1.2 CCD snímače – princip činnosti

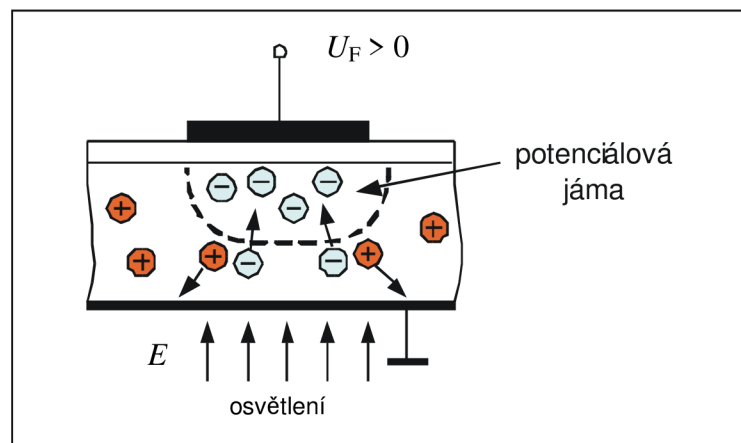
V optoelektronických měničích dochází k přeměně energie světelného záření na elektrický signál. (B)CCD (BCCD – Burried Channel CCD je technologicky zlepšená a dnes převážně užívaná verze technologie CCD s tzv. ponořeným kanálem). Tyto snímače patří mezi tzv. monolitické snímače a pracují na principu akumulčního vytváření obrazového signálu. Struktura světlocitlivých vrstev monolitických snímačů, na něž přes optickou soustavu dopadá proud fotonů odpovídající snímanému obrazu, obsahuje řádově miliony elementárních kapacitorů, v nichž se hromadí náboj po dobu trvání expozice (akumulace náboje)  $t_a$  jednoho snímku. Dle literatury [2] velikost vytvořeného obrazového signálu  $U_{oi}$  odpovídá době expozice  $t_a$  a intenzitě osvětlení  $E$ , tedy

$$U_{oi}(\lambda) = t_a \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S(\lambda) \cdot E(\lambda) d\lambda + U_r \cdot t_a, \quad (1)$$

- kde značí  $t_a$  dobu akumulace náboje v potenciálových jamách [s],  
 $S(\lambda)$  spektrální citlivost snímače [ $A \cdot J^{-1} \cdot m^2$ , případně  $V \cdot lx^{-1} \cdot s^{-1}$ ],  
 $E(\lambda)$  spektrální hustotu záření (intenzitu osvětlení)  $i$ -tého bodu [ $W \cdot m^{-2}$ , příp. lx].  
 Pro smluvní bílé světlo A platí, že  $1 \text{ lx} \cong 4,65 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot m^{-2}$ ,  
 $U_r$  souhrnný rušivý signál, tvořený především tzv. zbytkovým signálem v černé (Dark Signal)  $U_{DS}$  a šumovými signály  $U_s$ .

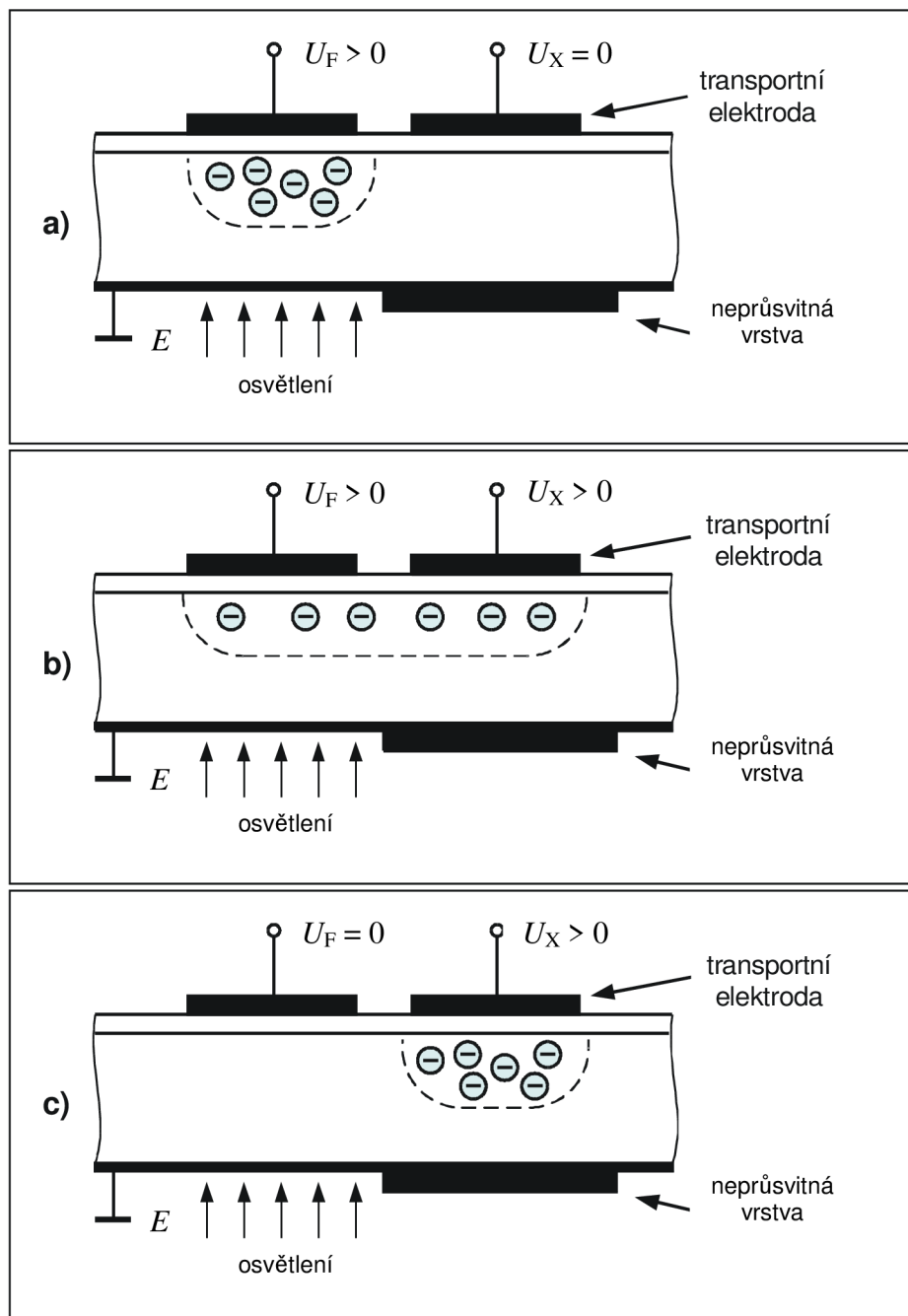
U CCD snímačů se nábojová kvanta hromadí v potenciálových jamách elementárních kapacitorů MIS (Metal Insulator Semiconductor). Akumulované nábojové pakety, úměrné světelné expozici, jsou přesouvány k převodníku náboje  $Q$  na napětí  $U_o$  přes analogové posuvné registry.

Celý postup je velmi dobře znázorněn a vysvětlen v [3]. Jak znázorňuje obr. 1 viz [3], při kladném napětí  $U_F$  na fotoelektrodě a vlivem osvětlení dochází ke generaci párů elektron-díra, přičemž elektrony jsou vlivem kladného napětí  $U_F$  přitahovány fotoelektrodou do potenciálových jam. Po dokončení expozice (různá doba podle typu aplikace) dochází k transportu akumulovaného náboje.



**Obr. 1:** Generace a koncentrace nábojů při osvětlení a kladném napětí  $U_F$  (převzato z [3]).

Princip transportu náboje je patrný z obr. 2 a), b), a c) viz [3]. Vedle fotoelektrody, pod kterou se za dobu expozice v odpovídající potenciálové jámě nahromadil náboj, je elektroda transportní, kterou chrání neprůsvitná vrstva.



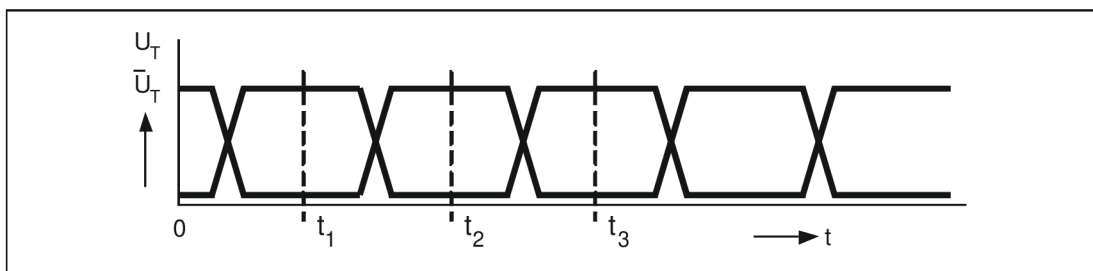
**Obr. 2:** a) akumulace náboje při kladném napětí  $U_F$  na fotoelektrodě a nulovém napětí  $U_X$  na transportní elektrodě,  
 b) rozložení náboje při kladném napětí na fotoelektrodě i na transportní elektrodě,  
 c) přesun náboje pod transportní elektrodu při nulovém napětí na fotoelektrodě (převzato z [3]).

V první fázi akumulace náboje je na fotoelektrodě kladné napětí  $U_F$  a na transportní elektrodě  $U_X$  napětí nulové viz obr. 2 a). Po uplynutí doby expozice je náboj nutné co nejrychleji přesunout kvůli tepelné generaci elektronů, která působí nežádoucí obrazový signál i bez dopadu světla.

Druhá fáze přesunu náboje spočívá v připojení kladného napětí i k transportní elektrodě. Náboj se tedy rozloží mezi obě elektrody s kladným napětím, jak je tomu na obr. 2 b).

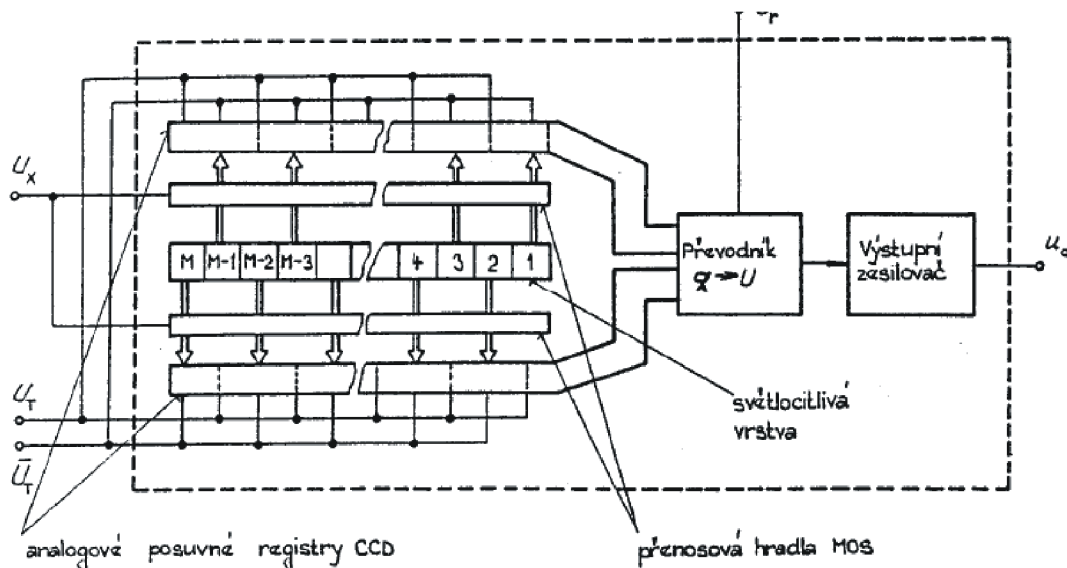
Ve třetí fázi zůstane kladné napětí pouze na elektrodě transportní, zatímco na fotoelektrodě se kladné napětí změní na nulové viz obr. 2 c). Tímto zajistíme přesun celého náboje pod transportní elektrodu. Struktura pod transportní elektrodou tak tvoří analogový posuvný registr, kterým se akumulovaný náboj (nábojová kvanta) přesunuje k převodníku náboje  $Q$  na napětí  $U_o$ .

Nábojové pakety jsou přes analogové posuvné registry k převodníku posouvány pomocí dvou nebo třífázových řídicích signálů  $U_T$ , jak je znázorněno na obr. 3 z [3].



**Obr. 3:** Řídicí signál  $U_T$  sloužící k přesunu nábojových kvant (převzato z [3]).

### 1.2.1 Řádkové CCD snímače



**Obr. 4:** Vnitřní struktura řádkového světlocitlivého snímače CCD (převzato z [2]).

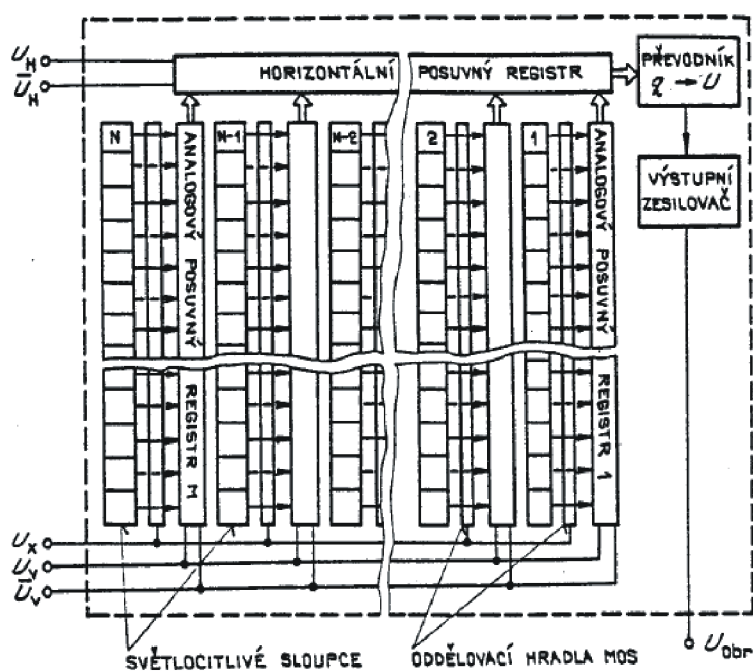
Tyto snímače mohou obsahovat v akumulární světlocitlivé vrstvě až 12000 světlocitlivých bodů v řádku (obvykle čtvercového tvaru o délce stran 7 až 10  $\mu\text{m}$ ). Obrazový signál z nich je možno vysouvat taktovacím kmitočtem až 50 MHz. Používají se zejména v měřicí technice

(např. bezdotykové měřiče rozměrů), jako snímače ve scanerech, faxech, čtečkách čárových kódů apod. Pro barevný obrazový signál jsou vybaveny trojbarevnými proužkovými filtry. Obsahují tři posuvné registry s výstupy třísloužkových barevných signálů a jsou používány zejména ve filmových snímačích a scanerech, jak udává literatura [2].

I přes velkou účinnost přenosu náboje však dochází v dlouhých registrech ke zmenšování velikosti nábojových kvant, zejména těch ze začátku registru. Tato skutečnost se ošetřuje přesouváním nábojových kvant (vždy střídavě sudých a lichých) do dvou analogových posuvných registrů, jak je znázorněno na obr. 4 viz [2].

## 1.2.2 Plošné CCD snímače

Plošné CCD snímače v digitálních kamerách a fotoaparátech vystřídaly na trhu videokamery s vakuovými snímacími elektronkami a kinofilmové fotoaparáty. Plošné CCD snímače se vyrábějí se světlocitlivými elementy umístěnými buď ve čtvercové nebo obdélníkové matici, podle typu použití. Obdélníkové matice CCD snímačů jsou většinou v poměru stran pro dnešní televizní standardy, tedy v poměru 16:9 nebo 4:3. Počet světlocitlivých prvků snímače se mění podle typu aplikace, pro kterou je určen. Dnešním standardem fotoaparátů je rozlišení asi 10 až 30 Mpixelů, u videokamer je podstatně menší, asi 0,5 až 1 Mpixel. Stále více rozšířené jsou i tzv. Full HD digitální kamery, které mají rozlišení kolem 2 Mpixelů. Obrazové snímače se vyrábějí obvykle ve velikostech 1/3“, 1/2“, 2/3“ a 1“. Vnitřní struktura plošného obrazového CCD snímače je znázorněna na obr. 5 viz [2].



**Obr. 5:** Vnitřní struktura plošného obrazového CCD snímače (převzato z [2]).

Plošné obrazové CCD snímače se dle [2] vyrábějí jako struktury:

- FT – Frame Transfer (snímkový přenos), díky oddělené snímací a paměťové sekci mají výhodnější využití světlocitlivé plochy (až 70%), dosahují menšího zkreslení (aliasing), jsou nejrozšířenější, ale mají větší efekt rozmazání (smear) ve vertikálním směru.
- IT – Inter Line Transfer (mezisloupcový přenos), většinu plochy zde tvoří zastíněné posuvné registry, využití světlocitlivé plochy tedy dosahuje asi 30%, ovšem při menším efektu vertikálního rozmazání.
- FIT – je kombinací obou předchozích struktur se sníženým efektem rozmazání.

Protože snímač (B)CCD vytváří obrazový signál úměrný pouze jasové distribuci snímané scény (i když jsou dle spektrální citlivosti různě citlivé pro různé vlnové délky dopadajícího záření), existují dvě možnosti, jak získat i složkové barevné signály pro reprodukci barevného obrazu. První možnost, kterou využívají neprofesionální kamery pro třísložkový barevný signál, je napaření barevných proužkových filtrů RGB. Pro záznam jednoho „barevného“ bodu tak slouží tři světlocitlivé elementy. Výsledná barva je získána kombinací barevných složkových signálů při signálovém zpracování.

Druhé, kvalitnější a nákladnější řešení, se využívá u profesionálních kamer a spočívá v použití tří světlocitlivých CCD snímačů pro jednotlivé barvy RGB. Snímaný obraz projde přes objektiv na dichroická zrcadla, která odrážejí světlo jen určité vlnové délky, zatímco světlo jiných vlnových délek projde zrcadlem dále. V současných barevných kamerách jsou v tzv. světelně dělicí části optické hranoly s dichroickými vrstvami pro rozdělení obrazu do tří dílčích obrazů v základních barvách RGB.

## 2 Problematika měření parametrů snímače zabudovaného v TV kameře

Měření některých parametrů obrazových CCD snímačů není jednoduché ani v případě, kdy je k dispozici přímý výstup obrazového signálu vlastního snímače, protože jde obvykle o kombinaci poměrně náročných optických a elektronických měřicích metod, vyžadujících odpovídající přístrojové vybavení. V tomto případě byla situace komplikována skutečností, že měření bylo nutno uskutečnit pouze prostřednictvím obrazového (video) výstupu kamery.

Jedním z prvních úkolů projektu je proto výběr parametrů obrazových CCD snímačů měřitelných tímto výrazně zjednodušeným způsobem a především kvalifikovaný a částečně i kvantifikovaný odhad toho, do jaké míry jsou výsledky těchto měření relevantní a do jaké míry jsou ovlivněny především elektronickým zpracováním obrazového signálu v kameře, případně optickou soustavou (objektivem) kamery.

Lepší možnost poskytují vývojové desky s CCD snímači, které dodávají výrobci pro konkrétní typ snímače. Na vývojové desce je možno měřit signál CCD snímače přímo, protože není ovlivněn optikou, vnitřními obvody a softwarem. Výstupní signál desky tak poskytuje konkrétní hodnoty. Vývojové desky poskytují i další možnosti, jako je například změna doby integrace náboje. Těchto možností lze využít pro kontrolu a srovnání výsledků s hodnotami naměřenými na video výstupu kamery.

## 2.1 Vliv vlastností optické soustavy (objektivu)

Při snímání obrazu analogovou nebo digitální TV kamerou (případně digitálním fotoaparátem) je první funkční částí, ovlivňující obraz promítaný na snímač a tedy i generovaný obrazový signál na video výstupu, optická soustava. Dnešní optické soustavy dosahují velmi dobrých vlastností i u relativně levných kamer a fotoaparátů. Mezi důležité vlastnosti optické soustavy patří zejména světelnost objektivu, barevné i geometrické zkreslení (např. soudkovitost), ohnisková vzdálenost a jiné. Z hlediska obrazového signálu lze objektiv považovat za lineární funkční blok. Dle [4] jeho optické rozlišení (vyjádřené obvykle tzv. přenosovou modulační funkcí MTF (Modulation Transfer Function), zejména v případě dražších objektivů, je stále ještě výrazně vyšší než rozlišovací schopnost současných CCD snímačů, a proto výsledky měření tohoto parametru prakticky neovlivňuje. Samozřejmě se uplatňuje jeho optický přenos (optické ztráty), ovlivněný tzv. světelností objektivu a dalšími parametry. Toto se projevuje snížením světelné citlivosti kamery vzhledem k světelné citlivosti vlastního snímače. Z údajů výrobce objektivu lze však tyto ztráty poměrně přesně vyjádřit.

Obecně lepších vlastností dosahují optické soustavy s pevnou ohniskovou vzdáleností. V současnosti se však v kamerách a fotoaparátech používají převážně objektivы s proměnnou ohniskovou vzdáleností, tzv. zoomem. Ten vlastnosti optické soustavy poněkud zhoršuje. Ovšem pro měření v rámci projektu nebyl použit.

CCD snímače v digitálních fotoaparátech dosahují výrazně vyšších rozlišení, než snímače televizních kamer, a proto i požadavky kladené na optickou soustavu jsou mnohem vyšší u fotoaparátů.

## 2.2 Vliv elektronického zpracování obrazového signálu v kameře

Vlastnosti elektronických obvodů kamery (obrazový zesilovač, aperturový korektor a v případě digitálních kamer také A/D a D/A převodníky případně i použitý software) teoreticky mohou ovlivnit výsledky měření některých parametrů snímače – především převodní charakteristiku snímače v absolutním vyjádření, její linearitu, případně odstup signálu od šumu S/N). Kromě těchto obvodů se teoreticky může na zkreslení výsledků podílet i modulátor úplného barevného signálu PAL, který je standardizován na video výstupech kamer používaných v České republice. Praktické zkoušky ukázaly, že převodní charakteristiky těchto obvodů v použité kameře MTV-12W1C jsou v rozsahu zpracovávaného obrazového signálu téměř dokonale lineární. Jedinou výjimku představují obvody automatického vyrovnávání světelné citlivosti kamery, které bylo nutno při měření vypnout. Hlavní problém tedy představuje stanovení celkového ekvivalentního napěťového přenosu všech elektronických obvodů mezi výstupem snímače a výstupem kamery. K jeho stanovení je možno použít jako referenční hodnotu např. výrobcem udávanou hodnotu saturační velikosti obrazového signálu při nasycení snímače. Je také možno měřit převodní charakteristiky v relativním vyjádření (velikost obrazového signálu vztažená k jeho saturační úrovni).

## 2.3 Vliv vlastností osvětlovacího zdroje

Světelný zdroj může měření parametrů ovlivnit hned několika způsoby. Prvním z nich je rovnoměrnost nasvětlení zkušebních obrazců. Úplné rovnoměrnosti v praxi nelze dosáhnout.

Může však být zanedbána při měření v částech obrazce, kde jsou jasně patrné například přechody černá-bílá a úroveň napětí obrazového signálu je v těchto odstínech konstantní.

Další důležitou vlastností světelného zdroje je tzv. tepelný ekvivalent vyzařovaného světla. Pro měření obrazových CCD snímačů jsou vhodné xenonové výbojky, žárovky či zářivkové zdroje s teplým odstínem bílé.

Pro měření parametrů je ještě nutné zajištění časové stálosti osvětlení. Jestliže je světelný zdroj napájen střídavým elektrickým proudem, na světlocitlivou vrstvu CCD snímačů dopadá pulsující světlo, které způsobuje změnu amplitudy obrazového signálu. Tento jev může být potlačen vyšším výkonem tepelných zářičů (např. žárovek), neboť dojde k větší tepelné setrvačnosti vlákna. Dalšími způsoby odstranění pulsujícího světla je použití stejnosměrného zdroje ke zhavení žárovek, zdroj osvětlení napájet vysokofrekvenčním proudem nebo použít více světelných zdrojů, napájených vícefázově.

Při měření spektrálních charakteristik snímačů představuje značný problém generování jednobarevných světél různých vlnových délek. Děje se tak pomocí barevných filtrů, jejichž barevná sytost se obvykle pohybuje mezi 80 – 90 %.

### 3 Parametry obrazových CCD snímačů

Výrobci obrazových CCD snímačů udávají komplexní údaje jednotlivých typů snímačů v datasheetech. Typickým údajem každého snímače je jeho velikost (např. 1/2“ snímač ICX429ALL použitý v měřené kameře), počet horizontálně a vertikálně umístěných světlocitlivých bodů (tedy rozlišení u plošných snímačů) nebo počet pixelů v řádku (u řádkových snímačů) a velikost jednotlivého pixelu. Dále výrobci udávají význam a rozložení pinů, blokové schéma snímače a tabulkové hodnoty parametrů (výstupní saturační napětí, zbytkový signál za tmy aj.). Firma Fairchild uvádí u svých snímačů i grafické znázornění typických průběhů některých parametrů, jako je spektrální citlivost, zbytkový signál za tmy, rozlišovací schopnost a další. Práce je zaměřena převážně na tyto parametry.

#### 3.1 Citlivost obrazových CCD snímačů

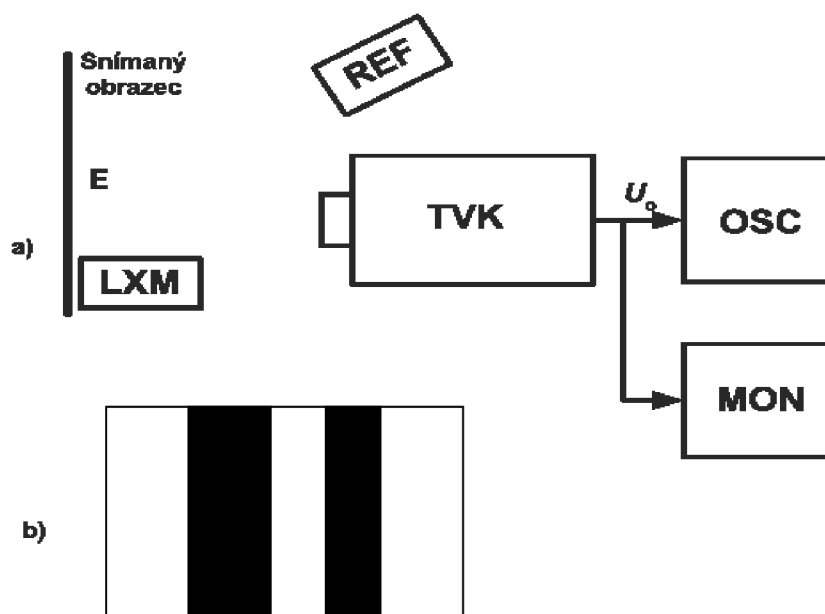
Dle literatury [5] citlivost obrazových CCD snímačů vyjadřuje strmost převodní charakteristiky optoelektronické transformace pro jasový signál. Převodní charakteristika je závislost mezivrcholové hodnoty napětí obrazového signálu  $U_o$  výstupu obrazového snímače CCD (obrazového výstupu TV kamery) na velikosti osvětlení světlocitlivé vrstvy snímače  $E$ . Citlivost snímačů je závislá na délce vlny dopadajícího záření, a proto je závislost této veličiny výrobci udávána pro tzv. smluvní bílé světlo. Mezinárodně jsou normalizována smluvní bílá světla A, B, C. Pro měření citlivosti obrazových snímačů se často používá standard bílého světla A, které odpovídá umělému světlu žárovky, jejíž tepelný ekvivalent barvy je  $T_e = 2854K$ , přestože je v televizní technice standardizováno smluvní bílé světlo C.

##### 3.1.1 Měření plošného snímače pomocí regulovatelného světelného zdroje

Převodní charakteristika CCD snímačů prakticky lineárně stoupá až do osvětlení fotocitlivé vrstvy blízkému saturačnímu osvětlení  $E_{sat}$ . Při saturačním osvětlení  $E_{sat}$  fotocitlivé vrstvy CCD snímače je dosaženo saturačního obrazového napětí  $U_{sat}$  na výstupu CCD

snímače. Výrobce snímače ICX429ALL v měřené TV kameře MINTRON MTV-12W1C udává velikost saturačního napětí  $U_{\text{sat}} = 1\text{V}$ . Tato velikost obrazového napětí CCD snímače bude referenční hodnotou saturačního napětí dosaženého při osvětlení  $E_{\text{sat}}$  na výstupu TV kamery. Porovnáním hodnoty saturačního obrazového napětí CCD snímače udávaného výrobcem a naměřeného saturačního obrazového napětí na obrazovém výstupu TV kamery bude zjištěn napěťový přenos všech elektronických obvodů mezi výstupem snímače a výstupem kamery pro převod hodnot naměřených na obrazovém výstupu TV kamery do hodnot ekvivalentních velikostem výstupního obrazového signálu CCD snímače.

Pracoviště měření převodní charakteristiky je znázorněno na obr. 6 a). Obr. 6 b) znázorňuje použitý zkušební obrazec pro měření mezivrcholových hodnot napětí obrazového (video) výstupu TV kamery.



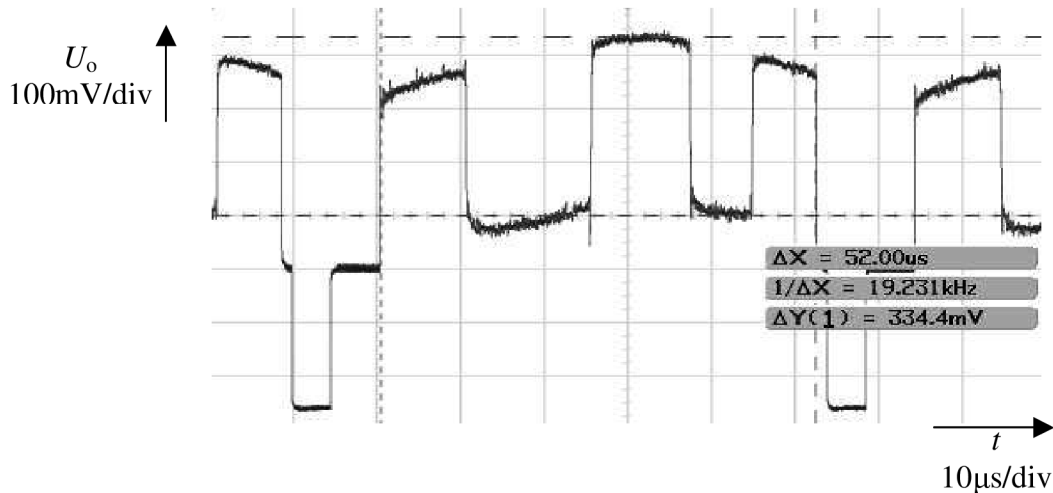
**Obr. 6:** a) Pracoviště pro měření převodní charakteristiky,  
b) použitý zkušební obrazec.

Zdroj osvětlení je vhodné umístit kolmo k ploše zkušebnímu obrazce, aby bylo dosaženo co nejvyšší rovnoměrnosti nasvětlení a nevznikaly tak redundantní jasové přechody. Čidlo luxmetru je umístěno v rovině zkušebnímu obrazce. Jestliže kamera umožňuje automatické vyrovnávání citlivosti, pro měření je nutné tuto funkci vypnout. Rovněž musí být vypnuto automatické nastavení clony.

Obr. 7 znázorňuje průběh signálu jednoho řádku CCD snímače na obrazovém (video) výstupu TV kamery MINTRON MTV-12W1C při snímání obrazce dle obr. 6 b). Nízké úrovně signálu znázorňují snímání černých pruhů zkušebnímu obrazce, vysoká úroveň je ekvivalentní bílé ploše obrazce.

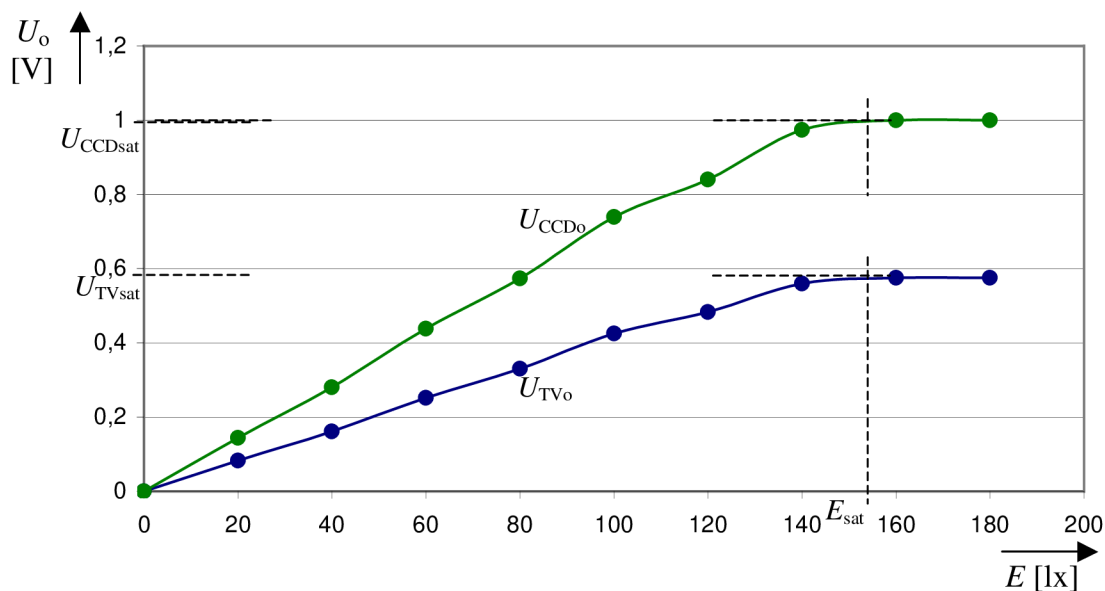
Na obr. 7 je patrná nerovnoměrnost nasvícení v krajních částech zkušebnímu obrazce, která se v oscilogramu projevuje poklesem či růstem úrovně výstupního obrazového signálu tam, kde by úroveň měla být konstantní. Při měření je tedy nutno jeden kurzor osciloskopu nastavit na nejnižší zobrazovanou úroveň signálu (odpovídající černé barvě zkušebnímu obrazce) a druhý na nejvyšší dosaženou úroveň.





**Obr. 7:** Průběh výstupního obrazového signálu jednoho řádku CCD snímače ICX429ALL na obrazovém výstupu TV kamery MINTRON MTV-12W1C ( $t_{\text{int}} = 20\text{ms}$ ,  $\theta_0 = 25^\circ\text{C}$ ).

Naměřená hodnota saturačního napětí na obrazovém výstupu TV kamery byla  $U_{\text{TVsat}} = 575\text{mV}$ . Porovnáním této hodnoty a hodnoty saturačního napětí obrazového signálu CCD snímače ICX429ALL udávaného výrobcem ( $U_{\text{CCDsat}} = 1\text{V}$ ), byl zjištěn napěťový přenos  $K \approx 1,739$ . Po úpravě naměřených mezivrcholových hodnot signálu  $U_{\text{TVo}}$  na obrazovém výstupu TV kamery napěťovým přenosem  $K$  je dosaženo hodnot ekvivalentních výstupnímu obrazovému signálu CCD snímače. Na obr. 8 je zobrazen průběh výstupního obrazového signálu  $U_{\text{TVo}}$  TV kamery a ekvivalentní průběh výstupního obrazového signálu  $U_{\text{CCDo}}$  CCD snímače.



**Obr. 8:** Převodní charakteristika CCD snímače ICX429ALL ( $t_{\text{int}} = 20\text{ms}$ ,  $\theta_0 = 25^\circ\text{C}$ ).

Převodní charakteristika by měla mít hladký lineární průběh. Drobné zvlnění je způsobeno nepřesností při měření. Zvolený software na zpracování naměřených hodnot rovněž nenabízel požadované proložení bodů.

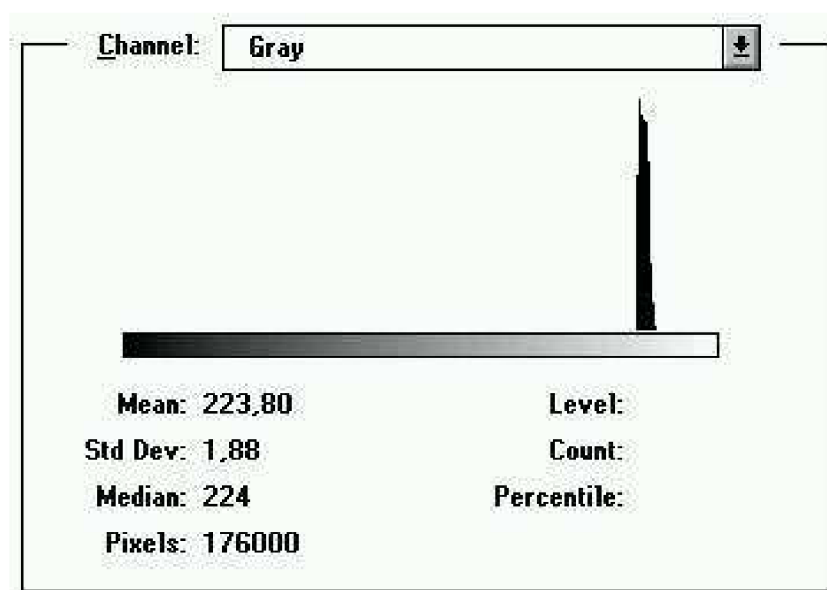
**Tab. 1:** Naměřené hodnoty převodní charakteristiky plošného CCD snímače ICX429ALL ( $t_{\text{int}} = 20\text{ms}$ ,  $\theta_0 = 25^\circ\text{C}$ ).

$E$ [lx]	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180
$U_{\text{TV}0}$ [V]	0	0,083	0,161	0,252	0,330	0,425	0,483	0,560	0,575	0,575
$U_{\text{CCD}0}$ [V]	0	0,144	0,280	0,438	0,574	0,739	0,840	0,974	1,000	1,000

### 3.1.2 Měření plošného snímače pomocí obrazce ve stupních šedi

Metoda spočívá v použití zkušebního obrazce ve stupních šedi s lineárním přechodem z černé barvy do bílé. Výstupní obrazový signál  $U_o$  tedy nebude závislý na osvětlení obrazce, ale na stupních šedi, které lze zjistit ve většině grafických softwarů pomocí histogramu viz obr. 9. Anglické pojmy na obr. 9 pocházejí z použitého softwaru Photoshop. Pracoviště je totožné s předchozím pro měření bez použití luxmetru.

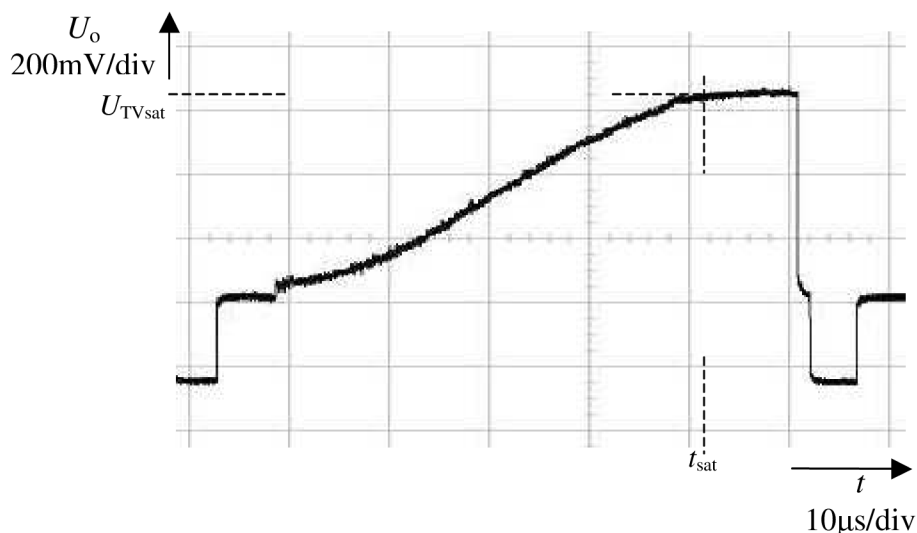
Oscilogram při snímání zkušebního obrazce zobrazuje přímo převodní charakteristiku, viz obr. 10. Výhodou této metody je možnost použití i u TV kamer, u kterých nelze vypnout automatické nastavení citlivosti a clony, protože osvětlení zkušebního obrazce zůstává konstantní.



**Obr. 9:** Histogram pro měření stupňů šedi.

Z obr. 10 je patrné, že bylo dosaženo téměř stejného průběhu jako na obr. 8. Nízké úrovně výstupního obrazového signálu TV kamery znázorňují tmavé odstíny zkušebního obrazce, vysoká úroveň představuje bílou barvu. Oscilogram znázorňuje i drobnou nelinearitu v nízké úrovni obrazového signálu, což je způsobeno malým světelným zářením odraženým na světlocitlivou vrstvu CCD snímače i od černé barvy zkušebního obrazce.

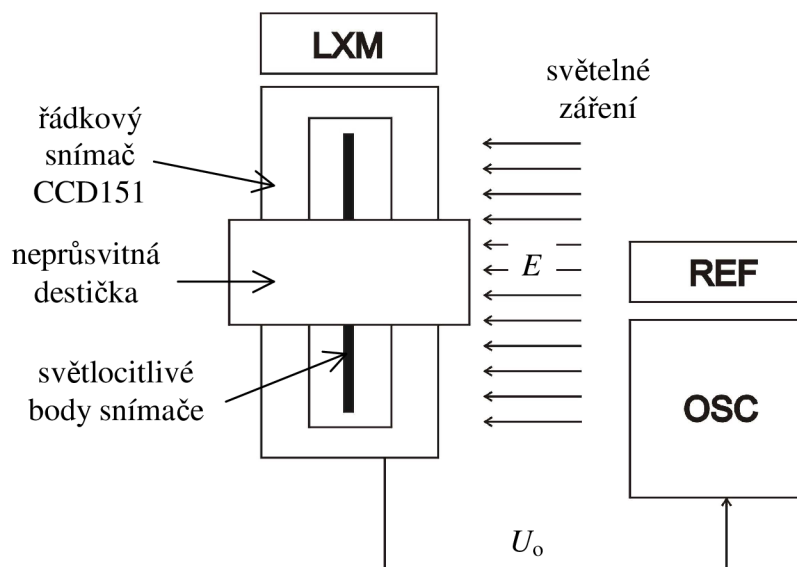
Doba trvání jednoho řádku normy CCIR D je  $t_{\text{ar}} \approx 52\mu\text{s}$  a lze tedy poměrně přesně zjistit, jakému časovému úseku odpovídají ekvivalentní hodnoty stupňů šedi zkušebního obrazce. Výsledná charakteristika tedy bude vyjadřovat závislost mezivrcholových hodnot výstupního obrazového signálu TV kamery na změně odstínu ve stupních šedi.



**Obr. 10:** Průběh výstupního obrazového signálu jednoho řádku CCD snímače ICX429ALL na obrazovém výstupu TV kamery MINTRON MTV-12W1C ( $t_{\text{int}} = 20\text{ms}$ ,  $\theta_0 = 25^\circ\text{C}$ ,  $E = \text{konst.}$ ).

### 3.1.3 Měření řádkového snímače pomocí regulovatelného světelného zdroje

Jelikož měření řádkového snímače CCD151 probíhalo na samotném snímači umístěném na zkušební desce, nebyl použit zkušební obrazec jako u měření plošného snímače v TV kameře, ale nízká úroveň výstupního obrazového signálu byla zajištěna zakrytím části snímače neprůsvitnou destičkou, přiloženou co nejbližší světlocitlivým bodům, tzn. na ochranné sklíčko snímače. Principiální náčrt pracoviště pro měření převodní charakteristiky je na obr. 11.



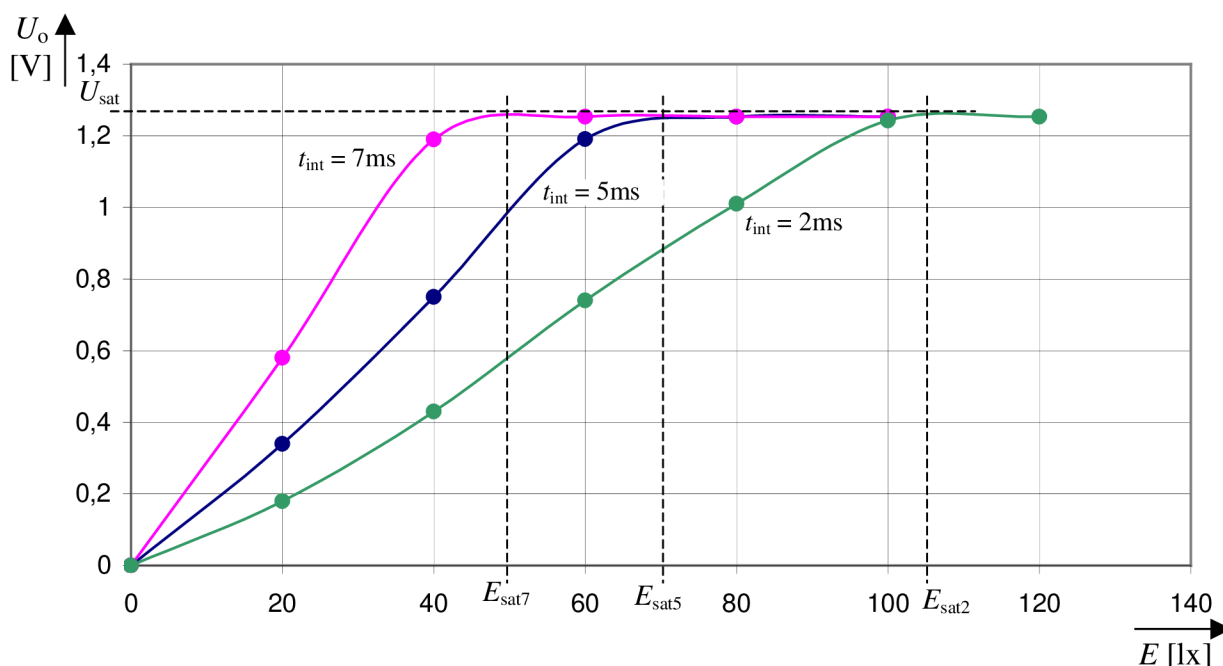
**Obr. 11:** Principiální náčrt zapojení pracoviště pro měření převodní charakteristiky řádkového snímače CCD151 firmy Fairchild.

Při měření bylo světelné záření o intenzitě  $E$  z regulovatelného světelného zdroje snímáno pouze velmi malou plochou. Plochu tvořilo 3456 světlocitlivých bodů o rozměrech  $7\mu\text{m} \times 7\mu\text{m}$  umístěných v jednom řádku. Měření tedy neovlivňovala nerovnoměrnost nasvícení, jako tomu bylo u plošného snímače, neboť na ploše  $7\mu\text{m} \times 25\text{mm}$  (délka řádku světlocitlivých bodů) se nemůže výrazněji projevit.

Vývojová deska výrobce umožňuje nastavení doby integrace náboje. Převodní charakteristika snímače CCD151 byla měřena pro doby integrace  $t_{\text{int}} = 2\text{ms}$ ,  $5\text{ms}$  a  $7\text{ms}$ . Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 2 a následně graficky zpracovány na obr. 12.

**Tab. 2:** Naměřené hodnoty převodní charakteristiky řádkového snímače CCD151 ( $\theta_0 = 25^\circ\text{C}$ ).

$E$ [lx]	0	20	40	60	80	100	120
$U_o$ [V] ( $t_{\text{int}} = 2\text{ms}$ )	0	0,180	0,430	0,740	1,010	1,243	1,253
$U_o$ [V] ( $t_{\text{int}} = 5\text{ms}$ )	0	0,340	0,750	1,191	1,253	1,253	1,253
$U_o$ [V] ( $t_{\text{int}} = 7\text{ms}$ )	0	0,580	1,190	1,253	1,253	1,253	1,253



**Obr. 12:** Převodní charakteristika řádkového snímače CCD151 ( $\theta_0 = 25^\circ\text{C}$ ).

Z obr. 12 vyplývá závislost strmosti převodní charakteristiky na době integrace náboje. Dle teoretických předpokladů je tato závislost lineární, což bylo měřením potvrzeno. Při intenzitě osvětlení např.  $E = 20\text{lx}$  (ještě se u žádného průběhu neprojevuje vliv saturace) je z obr. 12 i z hodnot tab. 2 patrná lineární závislost, kdy s rostoucí dobou integrace náboje lineárně roste i velikost výstupního obrazového signálu snímače CCD151. Při malých dobách integrace náboje je tedy saturačního výstupního obrazového napětí dosaženo později a u dlouhých dob integrace je saturace dosaženo dříve. V praxi je dlouhá doba integrace (dlouhá doba expozice) používána např. při nočních snímcích, kdy výsledný obraz poté obsahuje mnohem více detailů. Naopak krátká doba integrace náboje (krátká expozice) se používá při dobrých světelných podmínkách (např. za jasného počasí), aby ve snímané scéně nevznikaly

tzv. „přepaly.“ Ty jsou způsobeny dosažením saturačního napětí výstupního obrazového signálu.

Rovněž byl u tohoto snímače ověřen fakt, že převodní charakteristika lineárně stoupá s rostoucí intenzitou osvětlení  $E$  až k hodnotám blízkým saturačnímu napětí výstupního obrazového signálu  $U_{\text{sat}}$  stejně, jako tomu bylo u plošného snímače ICX429ALL měřeného na obrazovém výstupu černobílé digitální TV kamery.

### 3.1.4 Použité měřicí přístroje, vybavení

- **TVK** digitální kamera MINTRON MTV-12W1C s měřeným CCD snímačem SONY ICX429ALL,
- **OSC** osciloskop,
- **LXM** luxmetr,
- **MON** monitor (TV přijímač),
- **REF** halogenový reflektor s elektronickým regulátorem napětí,
- vývojová deska se zabudovaným řádkovým snímačem CCD151 firmy Fairchild,
- zkušební obrazce -svislý černý pruh na bílém pozadí,  
-lineární přechod z černé do bílé barvy,
- neprůsvitná destička,
- odpor  $75\Omega$  pro impedanční přizpůsobení,
- propojovací vodiče, rozbočovací „T“ člen.

### 3.1.5 Zhodnocení výsledků

Měřením citlivosti plošného CCD snímače ICX429ALL firmy SONY na obrazovém výstupu TV kamery není možné přímo dosáhnout výstupních obrazových hodnot signálu na CCD snímači, není tedy ani možné ověřit si saturační napětí na výstupu CCD snímače, udávané výrobcem. Výrobcem udávaná minimální hodnota saturačního napětí snímače je  $U_{\text{sat}} = 1\text{V}$ . Z této teoretické hodnoty saturačního napětí výstupního obrazového signálu CCD snímače a saturačního napětí změřeného na obrazovém výstupu TV kamery byl stanoven napěťový přenos vnitřních obvodů kamery  $K \approx 1,739$ . Při vynásobení naměřených hodnot výstupního obrazového signálu  $U_{\text{TVo}}$  napěťovým přenosem  $K$  bylo dosaženo teoretických hodnot výstupního obrazového signálu CCD snímače ICX429ALL. Vzniklá převodní charakteristika je tedy pouze teoretická a měření pouze přibližné. Tím, že výrobce neudává rozmezí hodnot saturačního napětí snímače, nelze stanovit ani možnou odchylku tohoto měření.

Při měření citlivosti je však důležitější tvar převodní charakteristiky, než přesné hodnoty. Proto by bylo možné použití relativní stupnice měření výstupního obrazového signálu, kdy by hodnota výstupního obrazového signálu  $U_{\text{TVo}}$  TV kamery byla v poměru se saturační hodnotou  $U_{\text{sat}}$  tohoto signálu. Vzniklá relativní převodní charakteristika by platila pro daný snímač, bez nutnosti převodu výstupních napětí při zachování totožného průběhu jako s konkrétními hodnotami výstupních signálů.

V případě druhého snímače CCD151 firmy Fairchild, umístěného na vývojové desce výrobce, bylo možné měřit konkrétní hodnoty výstupního obrazového signálu snímače. Firma Fairchild udává poměrně široké rozmezí saturačního napětí výstupního obrazového signálu snímače a to od 1V do 3V při typické hodnotě 2V. Na měřeném snímači bylo dosaženo hodnoty  $U_{\text{sat}} = 1,253\text{V}$ , tedy hodnoty blízké se dolní hranici udávané výrobcem. V obr. 12

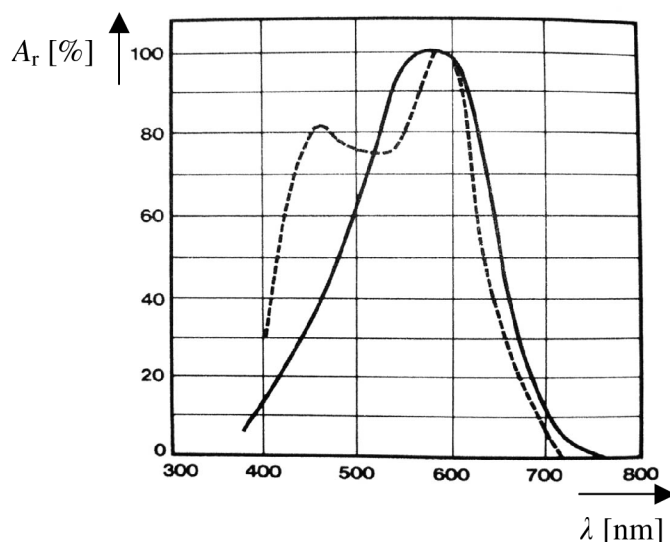
jsou zobrazeny průběhy převodní charakteristiky pro tři různé doby integrace. Je patrné, že při konstantním osvětlení  $E$  roste lineárně s dobou integrace  $t_{\text{int}}$  i velikost výstupního obrazového signálu snímače  $U_o$ .

Tím, že byly měřeny konkrétní hodnoty výstupního signálu CCD snímače a změřené saturační napětí spadalo do rozmezí udávaného výrobcem, bylo dle mého názoru měření poměrně přesné.

U obou metod měření dvou různých obrazových CCD snímačů se potvrdil teoretický předpoklad, že převod náboje  $Q$ , nahromaděného při expozici CCD snímače, na výstupní obrazový signál  $U_o$  je prakticky lineární až do hodnot saturačních osvětlení  $E_{\text{sat}}$  fotocitlivé vrstvy snímače.

### 3.2 Spektrální citlivost

Dle literatury [5] je spektrální citlivost obvykle definována jako závislost výstupního napětí snímače  $U_o$  vztaženého k plošné hustotě zářivé energie  $A_s$  na vlnové délce  $\lambda$  dopadajícího záření v pásmu vlnových délek 350nm až 1200nm. Někdy však výrobce udává jen relativní závislost na vlnové délce v rozmezí asi 300nm až 800nm, jak znázorňuje obr. 13 viz [6] pro obrazový CCD snímač CCD151 od firmy Fairchild. Průběh spektrální citlivosti firma Fairchild udává pro srovnávací bílá světla B, C (viz obr. 13), případně i pro světlo A. Výrobce měřeného obrazového snímače ICX429ALL v TV kameře MINTRON MTV-12W1C firma SONY tuto charakteristiku v relativní míře udává také, ale u charakteristiky je dodáno, že není zahrnut vliv světelného zdroje. Průběh charakteristiky spektrální citlivosti je však velmi podobný a téměř nezávislý na typu obrazového snímače a jeho výrobcí. Průběh naměřené spektrální charakteristiky tedy bude možné srovnat i s průběhem charakteristiky jiného snímače, neboť průběhy jsou závislé především na materiálově-technologických vlastnostech snímačů.



**Obr. 13:** Spektrální charakteristika pro bílá světla B (—) a C (---) řádkového snímače CCD151 firmy Fairchild (převzato z [6]).

### 3.2.1 Problematika zdroje osvětlení a barevných filtrů

Použitý typ zdroje osvětlení zkušební obrazce přímo ovlivňuje tvar spektrální charakteristiky, neboť různé zdroje osvětlení obsahují různé spektrální složky, což je patrné i z obr.13. S dostupným laboratorním vybavením nelze přesně dosáhnout mezinárodně normalizovaného smluvního bílého světla A, B, nebo C. Pro měření je nejvhodnější použití osvětlení odpovídajícího umělému světlu žárovky.

Pro měření spektrálních charakteristik plošného CCD snímače ICX429ALL firmy SONY a řádkového snímače CCD151 firmy Fairchild byly použity barevné filtry o vlnových délkách v rozmezí 400nm až 700nm (rozmezí viditelného spektra). U každého barevného filtru je uvedena vlnová délka záření, kterou filtr propouští.

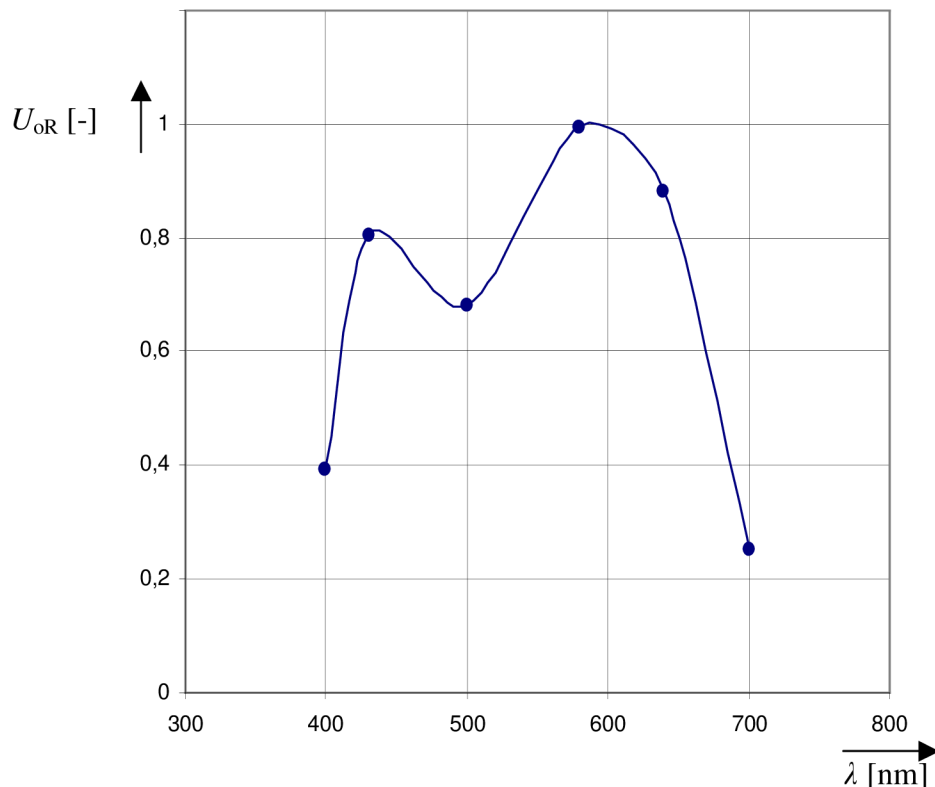
### 3.2.2 Metodika měření plošného CCD snímače

Měření spektrální charakteristiky CCD snímače ICX429ALL firmy SONY probíhalo na totožném pracovišti jako na obr. 6 a). Použit byl i shodný zkušební obrazec obr. 6 b), který byl osvětlen konstantním světelným zářením  $E$ . Změna vlnové délky záření dopadajícího na fotocitlivou vrstvu snímače byla ovlivňována barevnými filtry, umístěnými před objektivem TV kamery MINTRON MTV-12W1C. S dopadajícím světelným zářením o různé vlnové délce  $\lambda$  (omezené na viditelné spektrum) se měnila mezivrcholová hodnota výstupního obrazového signálu snímače. Protože výstupní obrazový signál byl měřen na obrazovém (video) výstupu TV kamery, jsou výsledky uvedeny v relativní míře podobně, jako znázorňuje obr. 13. Výhodou tohoto vyjádření výsledků je dosažení stejného průběhu spektrální citlivosti na obrazovém výstupu CCD snímače i výstupu TV kamery bez nutnosti přepočtu např. pomocí saturačního napětí snímače  $U_{\text{sat}}$ . Pro spektrální charakteristiku je důležitý právě průběh závislý na změně vlnové délky  $\lambda$ , nikoliv vyjádření absolutních hodnot.

Nejvyšší hodnoty mezivrcholového výstupního obrazového signálu  $U_{\text{omax}} = 356\text{mV}$  bylo dosaženo při vlnové délce světelného záření  $\lambda \approx 580\text{nm}$ . Poměrem mezivrcholových hodnot signálu  $U_o$  na ostatních vlnových délkách a této maximální hodnoty  $U_{\text{omax}}$  bylo dosaženo hodnot výsledků  $U_{\text{oR}}$  v relativní míře, kde je absolutní hodnota  $U_{\text{omax}}$  ekvivalentní i maximální hodnotě relativní  $U_{\text{oRmax}}$ . Naměřený průběh spektrální citlivosti v relativní míře je znázorněn na obr. 14, hodnoty měření uvádí tab. 3.

**Tab. 3:** Naměřené hodnoty spektrální citlivosti plošného obrazového CCD snímače ICX429ALL firmy SONY pro  $U_{\text{omax}} = 356\text{mV}$  ( $t_{\text{int}} = 20\text{ms}$ ,  $\theta_0 = 25^\circ\text{C}$ ,  $E = \text{konst.}$ ).

$\lambda$ [nm]	400	430	500	580	640	700
$U_o$ [mV]	140	287	243	356	315	90
$U_{\text{oR}}$ [-]	0,393	0,806	0,683	1,000	0,885	0,253



**Obr. 14:** Spektrální charakteristika plošného obrazového CCD snímače ICX429ALL firmy SONY ( $t_{\text{int}} = 20\text{ms}$ ,  $\theta_0 = 25^\circ\text{C}$ ,  $E = \text{konst.}$ ).

### 3.2.3 Metodika měření řádkového CCD snímače

Stejně, jako tomu bylo u zapojení pracoviště pro plošný snímač, tak i u řádkového snímače CCD151 firmy Fairchild se zapojení pracoviště pro měření spektrální citlivosti nemění, tzn. zapojení pracoviště odpovídá obr. 11. Změna vlnových délek záření, dopadajícího na řádkový snímač, byla ovlivňována totožnými barevnými filtry, jako u plošného snímače. To umožňuje srovnání průběhů spektrální charakteristiky obou měřených snímačů a ověření předpokladu, že charakteristiky by se měly lišit jen minimálně. Barevné filtry byly přikládány přímo na CCD snímač.

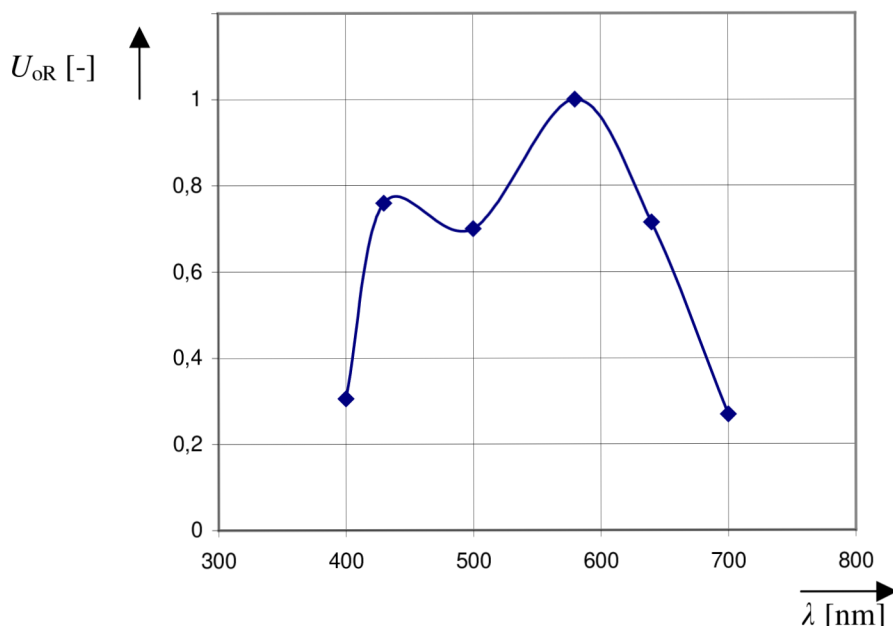
I když u řádkového snímače CCD151 byly měřeny skutečné hodnoty výstupního obrazového signálu snímače, výsledná charakteristika je opět v relativní míře, neboť tak udává spektrální citlivost i sám výrobce snímače, firma Fairchild. Díky tomu bude jednodušší srovnání jak naměřené charakteristiky řádkového snímače CCD151 s charakteristikou udávanou výrobcem, tak i srovnání s naměřenou charakteristikou plošného snímače ICX429ALL firmy SONY.

Samotný postup vyhodnocení výsledků zůstává totožný, jako u metodiky měření plošného snímače. Maximální velikosti výstupního obrazového signálu snímače  $U_{\text{omax}} = 469\text{mV}$  bylo dosaženo při vlnové délce záření  $\lambda \approx 580\text{nm}$ . Stejným poměrem veličin jako u měření spektrální citlivosti plošného snímače bylo opět dosaženo relativních hodnot výsledků  $U_{0R}$ . Naměřené výsledky jsou uvedeny v tab. 4 a graficky znázorněny na obr. 15.



**Tab. 4:** Naměřené hodnoty spektrální citlivosti řádkového obrazového snímače CCD151 firmy Fairchild pro  $U_{\text{omax}} = 469\text{mV}$  ( $t_{\text{int}} = 5\text{ms}$ ,  $\theta_0 = 25^\circ\text{C}$ ,  $E = \text{konst.}$ ).

$\lambda$ [nm]	400	430	500	580	640	700
$U_o$ [mV]	143	356	328	469	335	126
$U_{oR}$ [-]	0,305	0,759	0,699	1,000	0,714	0,269



**Obr. 15:** Spektrální charakteristika řádkového obrazového snímače CCD151 firmy Fairchild ( $t_{\text{int}} = 5\text{ms}$ ,  $\theta_0 = 25^\circ\text{C}$ ,  $E = \text{konst.}$ ).

### 3.2.4 Použité měřicí přístroje, vybavení

- **TVK** digitální kamera MINTRON MTV-12W1C s měřeným CCD snímačem SONY ICX429ALL,
- **OSC** osciloskop,
- **LXM** luxmetr,
- **MON** monitor (TV přijímač),
- **REF** halogenový reflektor s elektronickým regulátorem napětí,
- vývojová deska se zabudovaným řádkovým snímačem CCD151 firmy Fairchild,
- zkušební obrazec - svislý černý pruh na bílém pozadí,
- neprůsvitná destička,
- barevné filtry s udanou vlnovou délkou,
- odpor  $75\Omega$  pro impedanční přizpůsobení,
- propojovací vodiče, rozbočovací „T“ člen.

### 3.2.5 Zhodnocení výsledků

Měření spektrální citlivosti je v praxi poměrně velmi problematické a ve vybraném souboru parametrů snímačů v bakalářské práci asi nejobtížnější. Měření je náročné na přístrojové vybavení i na podmínky ovlivňující měření, a proto je metodika určování spektrální citlivosti s dostupným laboratorním vybavením velmi zjednodušená.

Průběh znázorněný na obr. 14 zobrazuje charakteristiku zjištěné spektrální citlivosti snímače ICX429ALL firmy SONY. Od charakteristiky udávané výrobcem se zjištěný průběh liší hlavně na krajích spektra, kde výrobce udává citlivost pro  $\lambda = 400\text{nm}$  asi 50% a pro  $\lambda = 700\text{nm}$  80%. Maximální hodnotu citlivosti výrobce udává pro vlnovou délku  $\lambda \approx 615\text{nm}$ . Firma SONY však u charakteristiky dodává, že udávaný průběh nezahrnuje vliv světelného zdroje. Výrobcem udávaná charakteristika je tedy dle mého názoru jen velmi orientační, neboť právě světelný zdroj hraje u spektrální citlivosti snímače důležitou roli. Jistou odchylku od měření jistě způsobil i objektiv TV kamery s měřeným snímačem.

Protože se u spektrální citlivosti (B)CCD snímačů jedná především o materiálově-technologické vlastnosti, pravděpodobně výhodnějšího srovnání bude dosaženo u průběhů spektrální charakteristiky plošného snímače ICX429ALL firmy SONY, řádkového snímače CCD151 firmy Fairchild a udávaným typickým průběhem spektrální charakteristiky snímače CCD151 právě firmou Fairchild pro smluvní bílé světlo C, které odpovídá dennímu světlu bez přímého slunečního záření.

Srovnáním citlivostí na odpovídajících vlnových délkách obou snímačů nebylo dosaženo odchylky větší, než 10% na celém rozsahu měřeného spektra. Výjimkou byla vlnová délka  $\lambda = 640\text{nm}$ , kde byla odchylka až 17%. Obecně větších odchylek od teoretického průběhu dosahovaly oba snímače na vyšších vlnových délkách a opět při vlnové délce  $\lambda = 640\text{nm}$  byly tyto rozdíly největší. Snímač CCD151 se na této vlnové délce lišil od teoretické hodnoty o 25%, u snímače ICX429ALL byla odchylka ještě markantnější, a to asi 40%. Právě zde se pravděpodobně nejvíce projevil použitý zdroj osvětlení a u TV kamery i objektiv. Jinak se teoretický průběh od obou měřených průběhů nelišil o více než asi 15%, což je dle mého názoru odchylka přijatelná, vzhledem k použitému laboratornímu vybavení a měřicím podmínkám.

Měření tedy byla ověřena velmi zjednodušená metodika určování spektrální citlivosti CCD snímačů v dostupných laboratorních podmínkách, neboť bylo dosaženo relativně uspokojivých výsledků.

### 3.3 Rozlišovací schopnost

Rozlišovací schopnost světlocitlivých (B)CCD snímačů závisí především na hustotě, na velikosti a rozteči jednotlivých pixelů světlocitlivé vrstvy. Počet pixelů nelze zvyšovat neomezeně. Brání tomu technologické možnosti výroby (v dnešní době jsou však i 60Mpixelové snímače) a také účinnost přenosu nábojových paketů analogovým posuvným registrem, viz podkapitola 1.2.1. Účinnost jednoho přenosu nábojového kvanta  $q$  v současných snímačích (B)CCD dosahuje hodnot  $\eta_q \approx 0,99999$ . Pro registr délky  $n$  řízený  $m$  fázovým taktováním dle literatury [2] platí

$$q_n = q_1 \cdot \eta_q^{n-m} \quad (2)$$

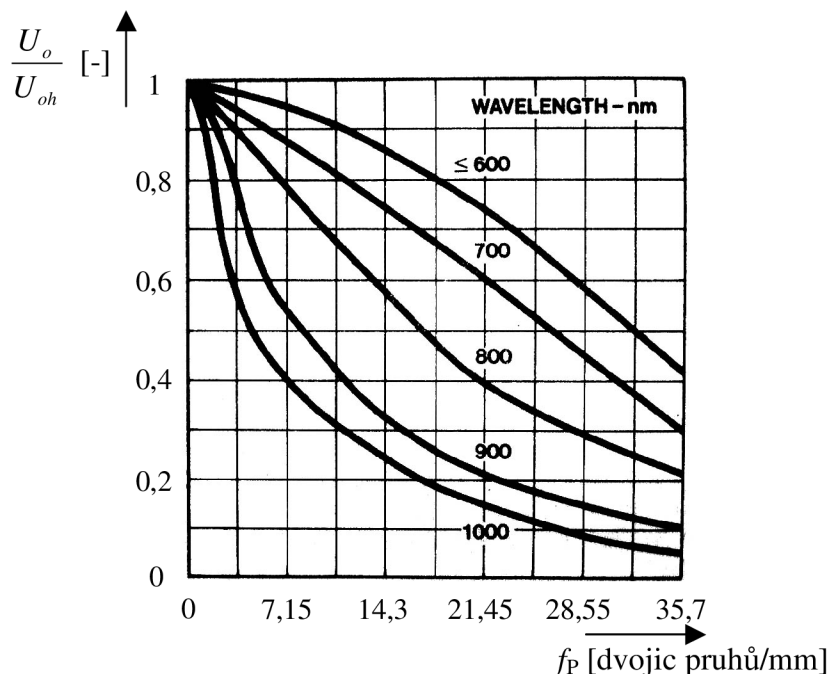
### 3.3.1 Modulační přenosová funkce

Literatura [4] a [5] uvádí, že prakticky se rozlišovací schopnost světlocitlivých snímačů (B)CCD posuzuje pomocí modulační přenosové funkce MTF (Modulation Transfer Function). Závislost charakterizuje vlastnosti optoelektronické transformace při snímání ostrých jasových přechodů. Výrobci obrazových CCD snímačů ji udávají pro snímače bez objektivu při různých spektrálních charakteristikách světelných zdrojů. Modulačních přenosových funkcí se využívá také pro vyjádření rozlišovacích vlastností optických soustav (objektivů), optoelektronických měničů atd.

Modulační přenosová funkce je definována jako závislost relativního obrazového signálu CCD snímače (TV kamery) na prostorovém kmitočtu  $f_p$  a dle literatury [5] platí vztah

$$MTF = \frac{U_o}{U_{oh}} = F(f_p), \quad (3)$$

kde značí  $U_{oh}$  mezivrcholovou hodnotu výstupního obrazového signálu snímače CCD (TV kamery) při homogenním osvětlení fotocitlivé vrstvy s intenzitou osvětlení  $E < E_{sat}$  pro nejnižší hodnotu prostorového kmitočtu  $f_p$  [V],  
 $U_o$  mezivrcholovou hodnotu výstupního obrazového signálu snímače CCD (TV kamery) při homogenním osvětlení fotocitlivé vrstvy s intenzitou osvětlení  $E < E_{sat}$  pro vyšší hodnoty prostorového kmitočtu  $f_p$  [V],  
 $f_p$  prostorový kmitočet, který udává počet vertikálně orientovaných pruhů (dvojic černého a bílého pruhu) připadajících na 1mm zkušebního obrazce [dvojic pruhů/mm].



**Obr. 16:** Modulační přenosová funkce udávaná výrobcem obrazového snímače CCD151 (převzato z [6]).

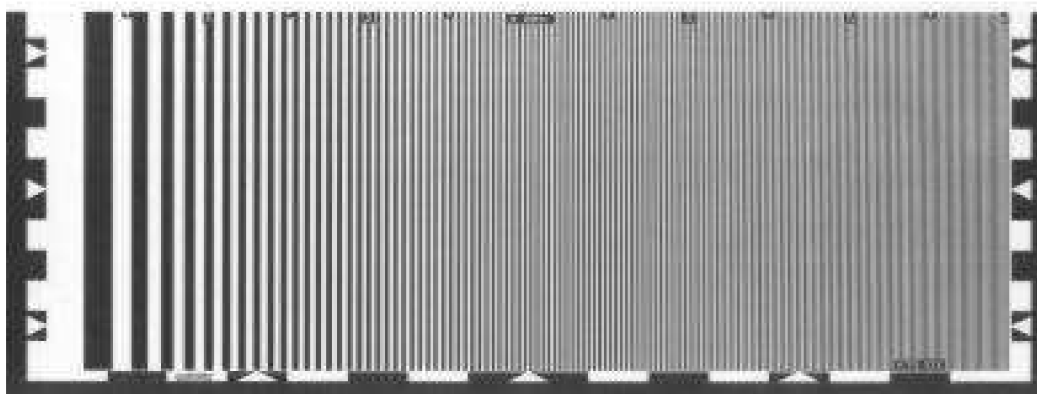
Obr. 16 literatury [6] zobrazuje modulační přenosovou charakteristiku obrazového snímače CCD151 pro různé spektrální charakteristiky světelného zdroje. Z průběhu je patrné, že modulační přenosová charakteristika pro konstantní počet dvojic pruhů/mm klesá s rostoucí vlnovou délkou světelného záření dopadajícího na fotocitlivou vrstvu snímače. Výrobce udává tuto charakteristiku v poměrně širokém spektru ( $\leq 600\text{nm}$  až  $1000\text{nm}$ ). V laboratorních podmínkách nebylo možné dosáhnout tak velkých vlnových délek, jako je infračervené záření. Měření je tedy omezeno na použité barevné filtry (viditelné spektrum) o vlnových délkách  $\lambda = 400\text{nm}$  až  $\lambda = 700\text{nm}$ .

### 3.3.2 Zkušební obrazce

Speciální zkušební obrazce nebo optické mřížky pro měření modulační přenosové funkce obrazových (B)CCD snímačů dosahují velmi velkých prostorových kmitočtů (i 100 pruhů/mm). To je způsobeno velikostí a vzdáleností jednotlivých pixelů snímače.

V laboratorním měření na TV kameře MINTRON MTV-12W1C bude použit zkušební obrazec, který zdaleka nedosahuje takové hustoty dvojic pruhů na milimetr. V tomto případě záleží na vzdálenosti TV kamery od zkušebního obrazce a její optické soustavě. Při měření by velký prostorový kmitočet v řádu desítek dvojic pruhů na milimetr neměl význam. Postačující hodnota maximálního prostorového kmitočtu bude i dvě dvojice pruhů na milimetr. Ukázka zkušebního obrazce použitého při měření je na obr. 17.

Při měření řádkového snímače CCD151 však nastává jiná situace. Zatímco u měření na TV kameře MINTRON byl zkušební obrazec vytisknut na papíře o velikosti  $\approx A4$ , k měření modulační přenosové funkce řádkového snímače bez použití optické soustavy je nutný zkušební obrazec malých rozměrů s podstatně větším prostorovým kmitočtem, vytisknutý na průhledné fólii. Prostorový kmitočet zkušebního obrazce byl limitován rozlišením tiskárny a bylo dosaženo hodnoty necelých šesti dvojic pruhů na milimetr. Fólie o délce asi 2,5cm (délka řádku světlocitlivých bodů snímače) je přiložena přímo na snímač.



Obr. 17: Zkušební obrazec pro měření rozlišovací schopnosti

### 3.3.3 Metodika měření plošného CCD snímače

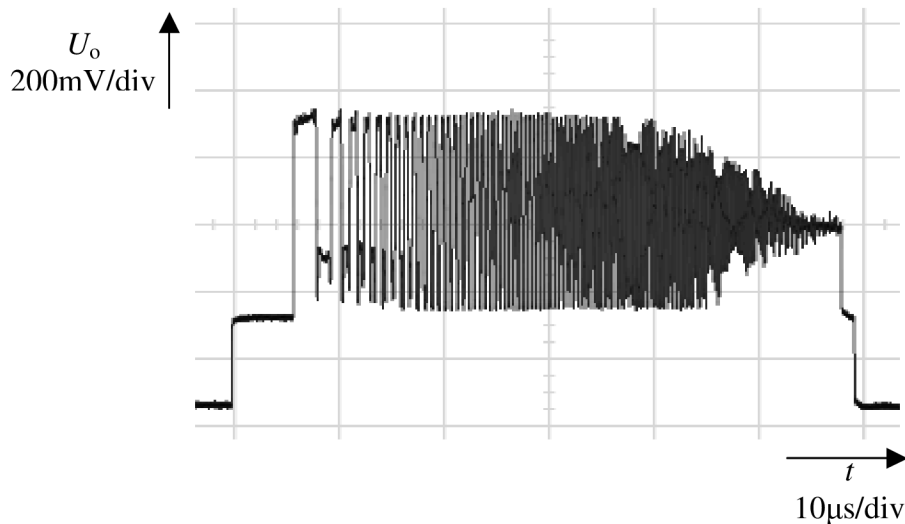
Pracoviště pro měření rozlišovací schopnosti je opět uvedeno na obr. 6 a). Před měřením je nutno kameru pečlivě zaostřit na zkušební obrazec. Kontrolou je co nejmenší pokles průběhu oscilogramu modulační přenosové funkce na osciloskopu OSC. Kameru je rovněž nutno nastavit tak, aby hroty bílých šipek zkušebního obrazce byly přesně na levém a pravém

okraji kontrolního monitoru **MON**. Tím je zajištěno, že doba snímání aktivní části obrazce odpovídá aktivní době řádku  $t_{ar} = 52\mu s$ .

Při nejnižším prostorovém kmitočtu  $f_p$  bude naměřena mezivrcholová hodnota výstupního obrazového signálu  $U_{oh}$ , ke které budou vztahovány hodnoty signálu  $U_o$  na vyšších prostorových kmitočtech  $f_p$  viz vzorec (3). Oscilogram výstupního obrazového signálu  $U_o$  TV kamery MINTRON MTV-12W1C je zobrazen na obr. 18.

Zkušební obrazec byl nasvětlen konstantním světelným zářením  $E$ . Změna vlnové délky záření byla prováděna barevnými filtry umístěnými před objektivem TV kamery. Modulační přenosová funkce byla naměřena pro několik vlnových délek spektra v rozmezí  $\lambda = 430nm$  až  $\lambda = 700nm$ .

Časové relace aktivní doby trvání jednoho řádku lze přepočítat na velikost prostorových kmitočtů jasové distribuce zkušební obrazce. Na obrazci jsou uvedeny prostorové kmitočty v jednotkách MHz. V grafech modulační přenosové funkce je vhodné uvádět prostorový kmitočet v přepočítaných rozměrech dvojic pruhů na milimetr, případně oběma měřítky osy.



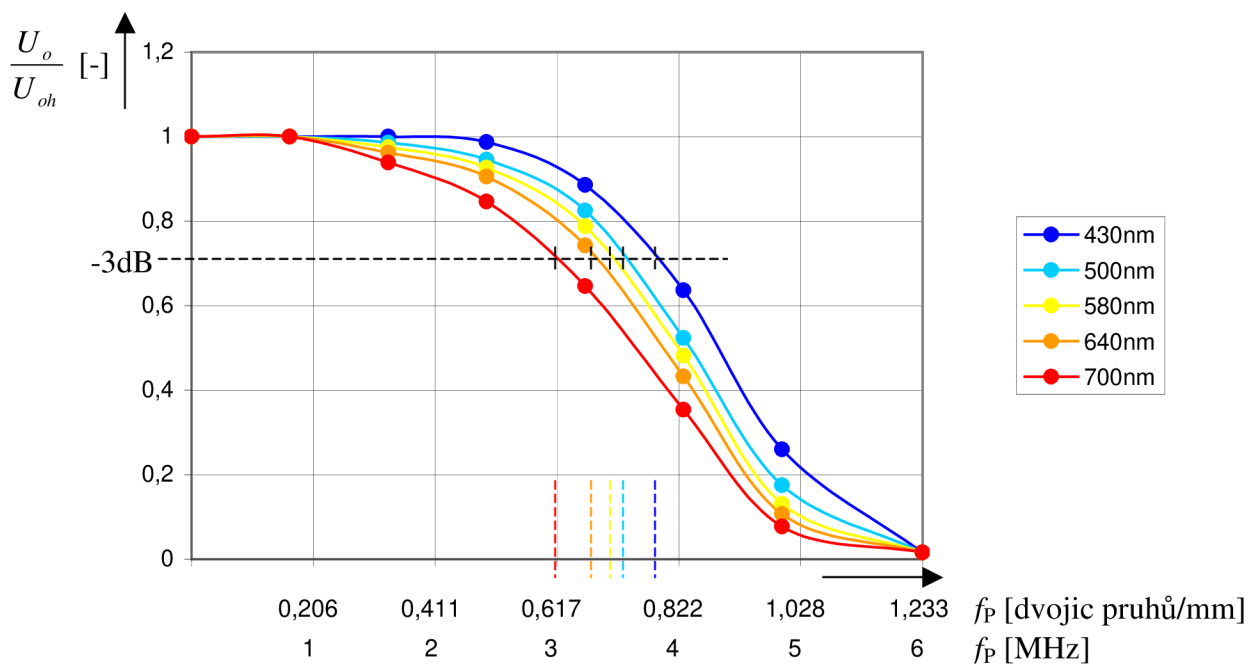
**Obr. 18:** Oscilogram měření modulační přenosové funkce CCD snímače ICX429ALL na obrazovém výstupu TV kamery MINTRON MTV-12W1C ( $t_{ar} = 52\mu s$ ,  $t_{int} = 20ms$ ,  $\theta_0 = 25^\circ C$ ,  $E = konst.$ ).

Na obr.19 je znázorněna modulační přenosová funkce obrazového CCD snímače ICX429ALL firmy SONY, naměřená na obrazovém (video) výstupu TV kamery MINTRON MTV-12W1C, jejíž objektiv byl ve vzdálenosti  $l \approx 40cm$ . Je patrné, že rozlišení klesá s rostoucí vlnovou délkou světelného záření. Určitého rozlišení bylo dosaženo u hodnoty prostorového kmitočtu asi  $f_p = 1$  dvojice pruhů/mm. Na vyšších prostorových kmitočtech již bylo rozlišení prakticky nulové. U hodnoty  $f_p = 1,233$  dvojic pruhů/mm se setkávají průběhy v jednom bodě. Zde byla naměřena nulová hodnota rozlišení pro všechny vlnové délky světelného záření. V tomto bodě však hodnota modulační přenosové funkce není rovna nulové hodnotě. Má zde vliv šumový signál obrazového signálu CCD snímače.

Na obr. 19 je rovněž znázorněn pokles modulační přenosové funkce o 3dB. Pro všechny vlnové délky nastal tento pokles v rozmezí prostorového kmitočtu  $f_p = 0,6$  dvojic pruhů/mm až  $f_p = 0,8$  dvojic pruhů/mm. Nejdříve klesla modulační přenosová funkce o 3dB pro vlnovou délku  $\lambda = 700nm$ , nejpozději pro krátkou vlnovou délku  $\lambda = 430nm$ . Naměřené hodnoty uvádí tab. 5.

**Tab. 5:** Naměřené hodnoty modulační přenosové funkce CCD snímače SONY ICX429ALL na obrazovém výstupu TV kamery MINTRON MTV-12W1C ( $t_{\text{ař}} = 52\mu\text{s}$ ,  $t_{\text{int}} = 20\text{ms}$ ,  $\theta_0 = 25^\circ\text{C}$ ,  $E = \text{konst.}$ ).

	$f_P$ [dvojic pruhů/mm]	0	0,165	0,330	0,496	0,661	0,826	0,998	1,233
$\lambda = 430\text{nm}$ $U_{\text{oh}} = 550\text{mV}$	$U_o/U_{\text{oh}} [-]$	1,000	1,000	1,000	0,987	0,885	0,636	0,260	0,016
$\lambda = 500\text{nm}$ $U_{\text{oh}} = 497\text{mV}$	$U_o/U_{\text{oh}} [-]$	1,000	1,000	0,986	0,946	0,825	0,523	0,175	0,016
$\lambda = 580\text{nm}$ $U_{\text{oh}} = 519\text{mV}$	$U_o/U_{\text{oh}} [-]$	1,000	1,000	0,975	0,927	0,788	0,482	0,131	0,016
$\lambda = 640\text{nm}$ $U_{\text{oh}} = 497\text{mV}$	$U_o/U_{\text{oh}} [-]$	1,000	1,000	0,962	0,905	0,742	0,433	0,107	0,016
$\lambda = 700\text{nm}$ $U_{\text{oh}} = 325\text{mV}$	$U_o/U_{\text{oh}} [-]$	1,000	1,000	0,938	0,846	0,646	0,354	0,077	0,016

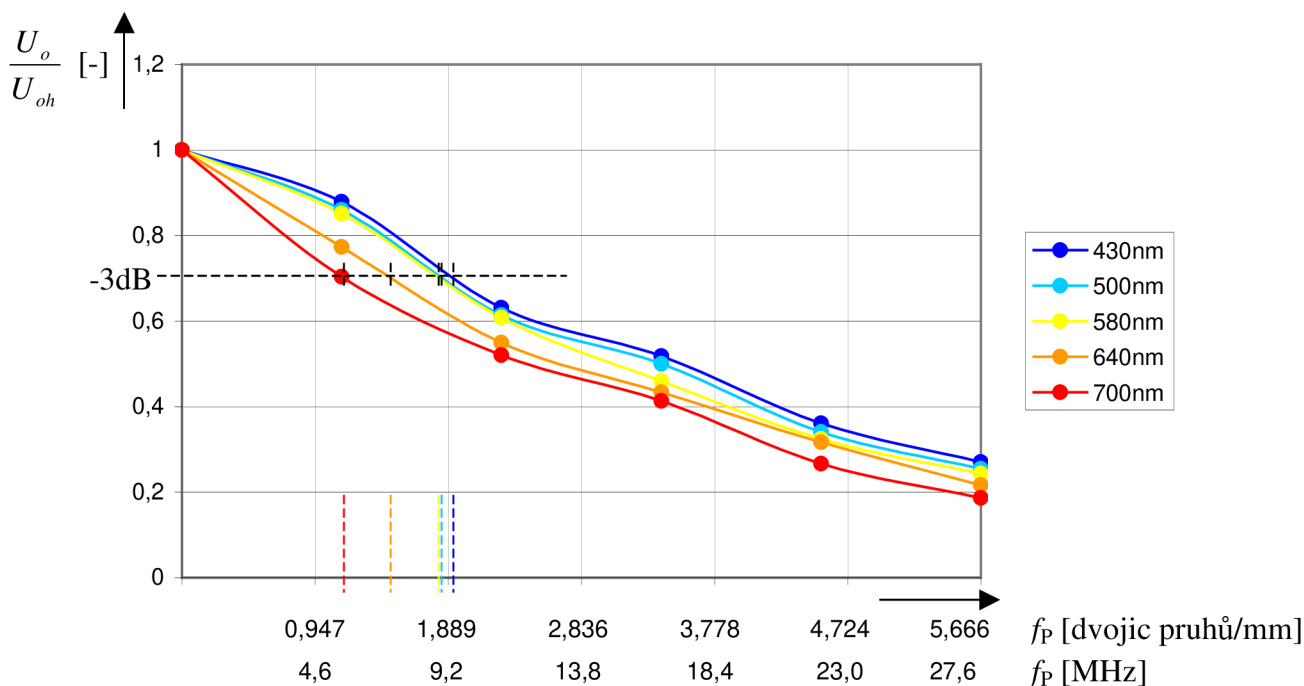


**Obr. 19:** Modulační přenosová funkce CCD snímače SONY ICX429ALL na obrazovém výstupu TV kamery MINTRON MTV-12W1C ( $t_{\text{ař}} = 52\mu\text{s}$ ,  $t_{\text{int}} = 20\text{ms}$ ,  $\theta_0 = 25^\circ\text{C}$ ,  $E = \text{konst.}$ ).

### 3.3.4 Metodika měření řádkového CCD snímače

Měření modulační přenosové charakteristiky bylo uskutečněno dle zapojení na obr. 11. Nebyla však přiložena neprůsvitná destička, ale zkušební obrazec viz kapitola 3.3.2. Samotné měření hodnot modulační přenosové charakteristiky bylo totožné s měřením plošného snímače.

U měření řádkového snímače CCD151 však vznikl jeden zásadní problém, ovlivňující měření. Nad světlocitlivými body snímače je umístěno ochranné sklíčko, které má určitou tloušťku (do 1mm). Zkušební obrazec tedy nebylo možné přiložit až na světlocitlivé body snímače a zvýšit tak strmost hran jasových přechodů. Světelné záření se na ochranném sklíčku rozkládalo a výrazným způsobem prodlužovalo délky nástupných i sestupných hran signálu. Z tohoto důvodu měření probíhalo při velmi nízké intenzitě osvětlení  $E$ , neboť u větších intenzit světelného záření se jasové přechody v signálu „slily“ a nebylo tak možné měřit vůbec.



**Obr. 20:** Modulační přenosová funkce řádkového snímače CCD151 ( $t_{\text{int}} = 2\text{ms}$ ,  $\theta_0 = 25^\circ\text{C}$ ,  $E = \text{konst.}$ ).

**Tab. 6:** Naměřené hodnoty modulační přenosové funkce řádkového snímače CCD151 ( $t_{\text{int}} = 2\text{ms}$ ,  $\theta_0 = 25^\circ\text{C}$ ,  $E = \text{konst.}$ ).

	$f_p$ [dvojic pruhů/mm]	0	1,178	2,384	3,590	4,768	5,666
$\lambda = 430\text{nm}$ $U_{\text{oh}} = 444\text{mV}$	$U_o/U_{\text{oh}} [-]$	1,000	0,879	0,631	0,518	0,361	0,270
$\lambda = 500\text{nm}$ $U_{\text{oh}} = 275\text{mV}$	$U_o/U_{\text{oh}} [-]$	1,000	0,860	0,614	0,500	0,341	0,255
$\lambda = 580\text{nm}$ $U_{\text{oh}} = 463\text{mV}$	$U_o/U_{\text{oh}} [-]$	1,000	0,851	0,608	0,459	0,324	0,243
$\lambda = 640\text{nm}$ $U_{\text{oh}} = 375\text{mV}$	$U_o/U_{\text{oh}} [-]$	1,000	0,733	0,549	0,433	0,317	0,217
$\lambda = 700\text{nm}$ $U_{\text{oh}} = 469\text{mV}$	$U_o/U_{\text{oh}} [-]$	1,000	0,704	0,520	0,413	0,267	0,187

Naměřená modulační přenosová funkce řádkového snímače CCD151 je na obr. 20, hodnoty uvádí tab.6. Dle obr. 20 je pokles modulační přenosové charakteristiky poměrně

velmi rychlý, i když prostorový kmitočet nedosahuje vysokých hodnot. Rychlý pokles je způsoben právě nízkou intenzitou osvětlení snímače. Narozdíl od měřeného plošného snímače nebylo mřížkou zkušebního obrazce dosaženo takového prostorového kmitočtu, aby modulační přenosová funkce na všech vlnových délkách končila v jednom bodě. Měření modulační přenosové funkce tedy bylo limitováno ochranným sklíčkem, které by muselo být odstraněno pro dosažení korektnějších výsledků, a zkušebním obrazcem, který by měl mít prostorový kmitočet např. desetinásobný.

Pokles charakteristiky o 3dB nastal ve výrazně vyšším rozmezí prostorového kmitočtu ( $\Delta f_p \approx 1$  dvojice pruhů/mm), než u plošného snímače ( $\Delta f_p \approx 0,2$  dvojice pruhů/mm). Dle předpokladů však tento pokles nastal ve stejném pořadí vlnových délek.

### 3.3.5 Použité přístroje, vybavení

- **TVK** digitální kamera MINTRON MTV-12W1C s měřeným CCD snímačem SONY ICX429ALL,
- **OSC** osciloskop,
- **LXM** luxmetr,
- **MON** monitor (TV přijímač),
- **REF** halogenový reflektor s elektronickým regulátorem napětí,
- vývojová deska se zabudovaným řádkovým snímačem CCD151 firmy Fairchild,
- zkušební obrazec – jasová distribuce vertikálních pruhů s rostoucím horizontálním prostorovým kmitočtem,
- barevné filtry s udanou vlnovou délkou,
- odpor  $75\Omega$  pro impedanční přizpůsobení,
- propojovací vodiče, rozbočovací „T“ člen.

### 3.3.6 Zhodnocení výsledků

Na první pohled je patrné, že teoretická modulační přenosová funkce na obr. 16 se liší s naměřenými na obr. 19 a obr. 20 tvarem i prostorovými kmitočty.

Tvar modulační přenosové funkce ovlivňuje právě prostorový kmitočet zkušebních obrazců, ale také vlnové délky záření, dopadající na fotocitlivou vrstvu snímače. Použité vlnové délky byly omezeny barevnými filtry pouze na viditelné spektrum, ale výrobci udávají modulační přenosové funkce i pro vlnové délky  $\lambda = 1000\text{nm}$ , kterých nebylo možné s dostupným laboratorním vybavením dosáhnout.

U plošného CCD snímače ICX429ALL firmy SONY bylo dosaženo prostorového kmitočtu, kdy již snímač hustotu jasové distribuce nerozezná. Proto i modulační přenosové funkce na všech vlnových délkách skončily na prostorovém kmitočtu  $f_p = 1,233$  dvojic pruhů/mm v jednom bodě. Jak je již uvedeno v podkapitole 3.3.2, použitý zkušební obrazec pro měření modulační přenosové funkce na TV kameře nemusí dosahovat velkých prostorových kmitočtů, jako mřížky a obrazce pro měření samotných CCD snímačů, neboť při měření na TV kameře je nutno zahrnout vzdálenost optické soustavy (objektivu) od zkušebního obrazce, případný zoom objektivu a zaostření. Tyto vlivy při měření modulační přenosové funkce samotného obrazového (B)CCD snímače nehrají roli. Z obr. 20 je proto zřejmé, že u snímače CCD151 firmy Fairchild musel být použit obrazec s mnohem vyšším prostorovým kmitočtem (až  $f_p = 5,666$  dvojic pruhů/mm). V praxi je poměrně složité vytvářet obrazce, které obsahují např. 50 dvojic pruhů/mm. Tvorba zkušebního obrazce pro měření na



snímači CCD151 byla omezena hlavně rozlišením tiskárny. Modulační přenosová funkce na obr. 20 snímače CCD151 naznačuje, že snímač na použitém zkušebním obraze nedosáhl takového prostorového kmitočtu, aby nerozeznal hustotu jasové distribuce obrazce.

Měření modulační přenosové funkce na poměrně malém rozmezí vlnových délek záření dopadajícího na fotocitlivou vrstvu CCD snímače i tak potvrdilo předpoklad, že na konstantním prostorovém kmitočtu klesá rozlišovací schopnost snímače s rostoucí vlnovou délkou. Vyšší vlnová délka záření způsobuje strmější klesání modulační přenosové funkce.

Přesnost měření rozlišovací schopnosti se nedá v tomto případě jednoznačně určit, neboť ani srovnání s teoretickými hodnotami není dost dobře možné z důvodů výše popsaných.

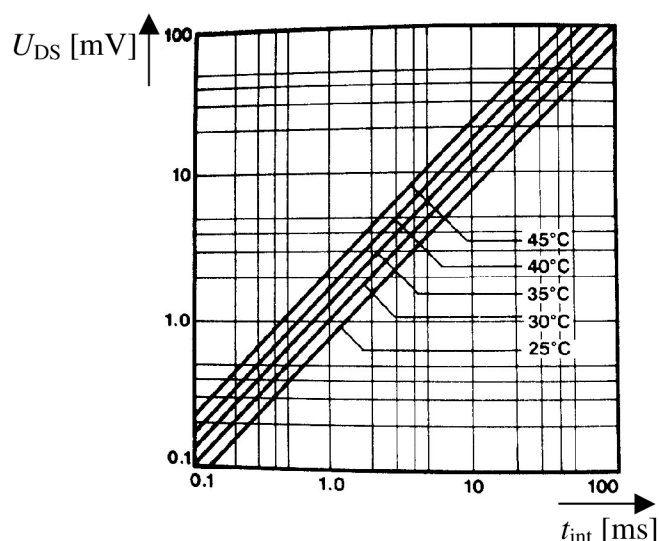
### 3.4 Zbytkový signál za tmy

Rušivé signály představují nežádoucí složky obrazového signálu obrazových (B)CCD snímačů omezující jejich pracovní dynamický rozsah. Rušivé signály tvoří především zbytkový signál za tmy, nerovnoměrnost obrazového signálu při osvětlení a šumové signály. Projekt se detailně zabývá zbytkovým signálem za tmy, který je výrazně závislý na teplotě a na době integrace.

Zbytkový signál za tmy vzniká tepelnou generací náboje v potenciálových jamách při pracovní teplotě  $\theta_p$ . Výrobci udávaná hodnota zbytkového signálu za tmy bývá obvykle uváděna pro teplotu  $\theta_0 = 25^\circ\text{C}$ .

Dle literatury [5] se zbytkový signál za tmy ( $U_{DS}$  – Dark Signal) skládá ze stejnosměrné ( $U_{DSDC}$  – Dark Signal DC Component) a nízkofrekvenční ( $U_{DSLFC}$  – Dark Signal Low Frequency Component) složky. Zbytkový signál za tmy  $U_{DS}$  představuje jejich superpozici.

Zbytkový signál za tmy vyjadřuje závislost výstupního obrazového signálu CCD snímače na době integrace při pracovní teplotě a nulovém osvětlení fotocitlivé vrstvy obrazového snímače. Výrobce snímače CCD151 firma Fairchild tento parametr udává graficky viz obr. 21 lit. [6].

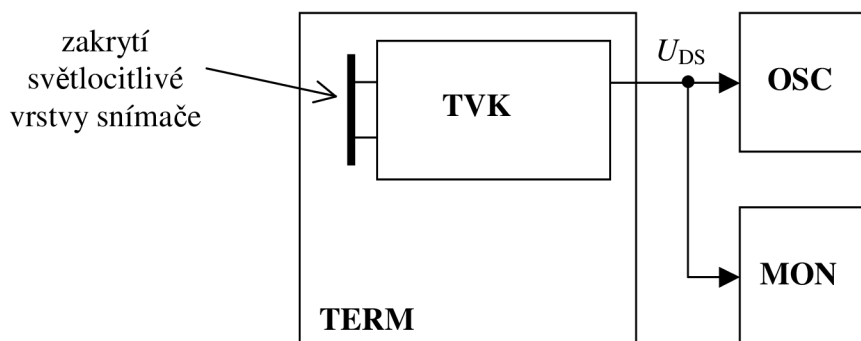


**Obr. 21:** Závislost zbytkového signálu za tmy na době integrace a teplotě udávaná výrobcem Fairchild obrazového snímače CCD151 (převzato z [6]).

Závislost na obr. 21 je pro snímač CCD151, může být ale použita i pro srovnání naměřených hodnot CCD snímače ICX429ALL firmy SONY, neboť zbytkový signál za tmy je především materiálově-technologická vlastnost a nijak výrazně se neliší podle typu a výrobce obrazového snímače.

### 3.4.1 Metodika měření plošného snímače

Měření plošného snímače ICX429ALL firmy SONY proběhlo na pracovišti zapojeném dle obr. 22.



**Obr. 22:** Zapojení pracoviště pro měření zbytkového signálu za tmy  $U_{DS}$  plošného snímače ICX429ALL.

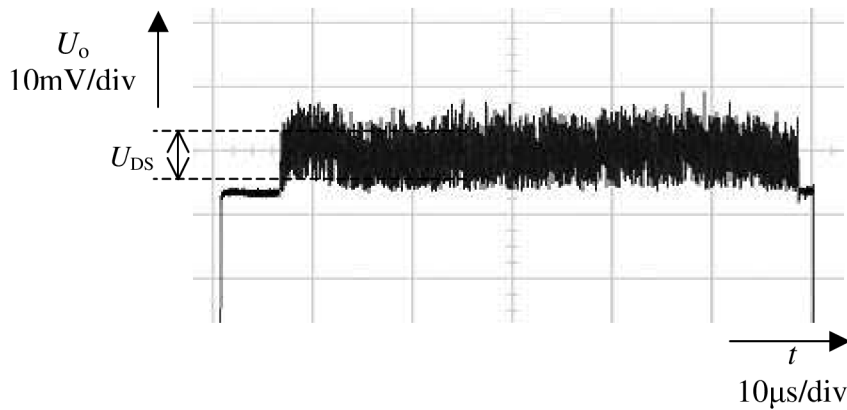
U TV kamery není možné měnit dobu integrace náboje snímače. Ta je pevně dána dobou  $t_{int} = 20\text{ms}$ , což je doba trvání jednoho snímku TV kamery. Určení hodnoty zbytkového signálu za tmy se provádí změřením mezivrcholové hodnoty výstupního obrazového signálu TV kamery při zatemnění fotocitlivé vrstvy obrazového snímače - zakrytím objektivu TV kamery. Osvětlení snímače je tedy  $E = 0\text{ lx}$ .

Nastavení teploty snímače pro měření bylo prováděno pomocí termostatu. Ověření teploty snímače kontaktním teploměrem ovšem nebylo možné. To bylo ošetřeno působením konstantní teploty na celé zařízení po delší časový interval a lze tedy předpokládat, že nastavené teploty bylo dosaženo i na obrazovém CCD snímači TV kamery.

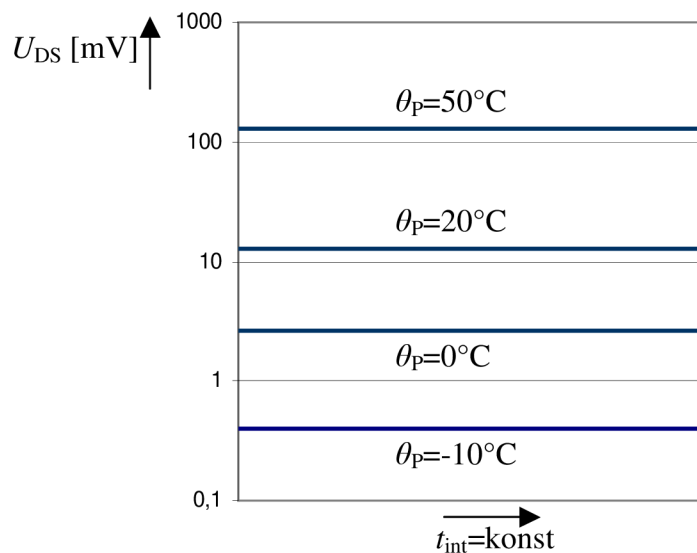
Naměřené hodnoty zbytkového signálu za tmy snímače od firmy SONY obsahuje tab. 7. Grafické zpracování výsledků je na obr. 24. Naměřené hodnoty na obrazovém výstupu TV kamery bylo ještě nutné upravit přenosem  $K$ , stejně jako tomu bylo u hodnot převodní charakteristiky v kapitole 3.1.1, aby bylo dosaženo hodnot alespoň částečně ekvivalentních obrazovému výstupu CCD snímače. Oscilogram na obr. 23 zobrazuje měření zbytkového signálu za tmy.

**Tab. 7:** Naměřené hodnoty závislosti zbytkového signálu za tmy snímače ICX429ALL firmy SONY ( $E = 0\text{ lx}$ ,  $t_{int} = 20\text{ms}$ ).

$\theta_P$ [°C]	-10	0	20	50
$U_{DS}$ [mV]	0,4	2,6	13,0	128,0



**Obr. 23:** Oscilogram zbytkového signálu za tmy CCD snímače ICX429ALL ( $E = 0\text{lx}$ ,  $t_{\text{int}} = 20\text{ms}$ ,  $\theta_p = 20^\circ\text{C}$ ).



**Obr. 24:** Naměřené závislosti zbytkového signálu za tmy snímače ICX429ALL firmy SONY ( $E = 0\text{ lx}$ ,  $t_{\text{int}} = 20\text{ms}$ ).

### 3.4.2 Metodika měření plošného snímače

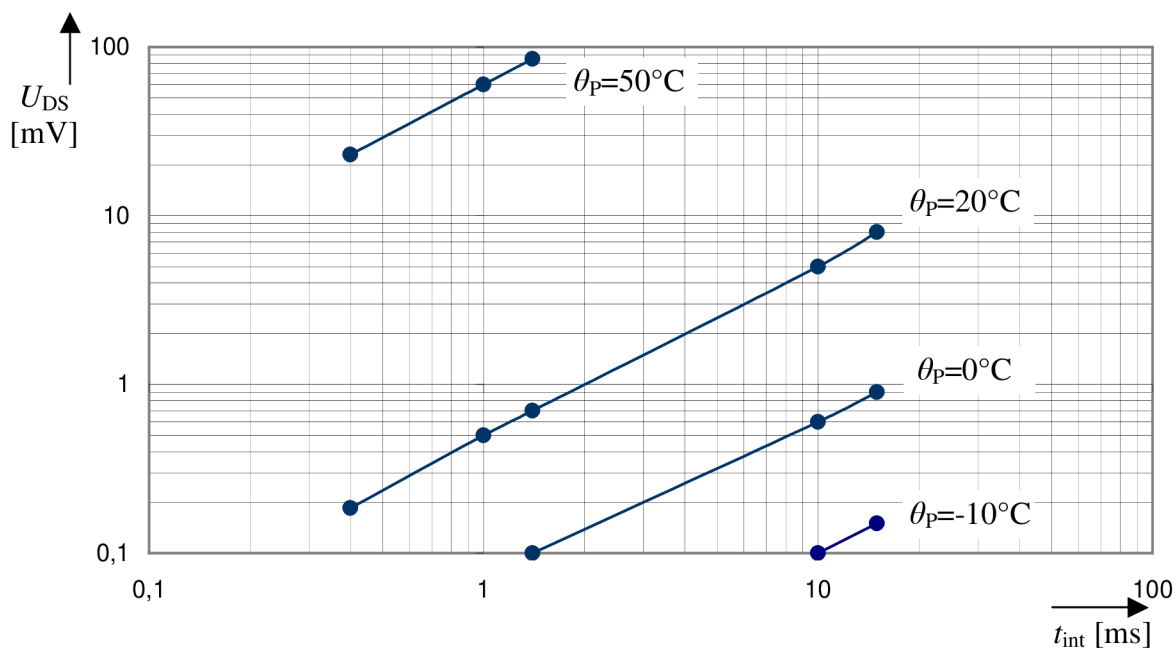
Řádkový snímač byl měřen na shodném pracovišti, jako je na obr. 22, pouze s rozdílem, že měření neprobíhalo na TV kameře, ale na vývojové desce se snímačem CCD151 Fairchild, který měl zakrytu světlocitlivou vrstvu neprůsvitnou destičkou.

Vývojová deska výrobce umožňuje i nastavení doby integrace náboje v poměrně širokém rozmezí, čehož je využito pro potvrzení teoretického předpokladu a hodnot na obr. 21, že s rostoucí dobou integrace  $t_{\text{int}}$  roste i velikost zbytkového signálu za tmy. Byl měřen obrazový výstup samotného CCD snímače, čili u tohoto měření není žádný přepočítání získaných hodnot, jako tomu bylo u snímače v TV kameře. Tímto je možno poměrně velmi přesně ověřit naměřené výsledky srovnáním s teoretickými od výrobce.

Opět byla měřena mezivrcholová hodnota signálu  $U_{DS}$ , podobně, jak znázorňuje obr. 23 pro plošný snímač. Naměřené hodnoty a graficky zpracované výsledky jsou uvedeny v tab. 8 a na obr. 25.

**Tab. 8:** Naměřené hodnoty závislosti zbytkového signálu za tmy snímače CCD151 firmy Fairchild ( $E = 0 \text{ lx}$ ).

	$t_{\text{int}}$ [ms]	0,4	1,0	1,4	10,0	15,0
$\theta_P = -10^\circ \text{C}$	$U_{\text{DS}}$ [mV]	-	-	-	0,1	0,16
$\theta_P = 0^\circ \text{C}$	$U_{\text{DS}}$ [mV]	-	-	0,1	0,6	0,9
$\theta_P = 20^\circ \text{C}$	$U_{\text{DS}}$ [mV]	0,19	0,5	0,7	5,0	8,0
$\theta_P = 50^\circ \text{C}$	$U_{\text{DS}}$ [mV]	23,0	60,0	85,0	-	-



**Obr. 25:** Naměřené závislosti zbytkového signálu za tmy snímače CCD151 firmy Fairchild ( $E = 0 \text{ lx}$ ).

### 3.4.3 Použité měřicí přístroje, vybavení

- **TVK** digitální kamera MINTRON MTV-12W1C s měřeným CCD snímačem SONY ICX429ALL,
- vývojová deska s měřeným snímačem CCD151 firmy Fairchild,
- **OSC** osciloskop,
- **MON** monitor (TV přijímač),
- **TERM** termostat pro nastavení teploty,
- kontaktní teploměr pro ověření teploty snímače,
- odpor  $75\Omega$  pro impedanční přizpůsobení,
- propojovací vodiče, rozbočovací „T“ člen.

### 3.4.4 Zhodnocení výsledků

Oba snímače byly měřeny při teplotách  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $20^{\circ}\text{C}$  a  $50^{\circ}\text{C}$ . Srovnáním naměřené závislosti s udávanou výrobcem pro snímač CCD151 bylo dosaženo ekvivalentních výsledků. Výrobce neudává přímo hodnoty pro měřené pracovní teploty snímače, průběh si však lze odvodit. Rovněž u obrazového snímače od firmy SONY v TV kameře MINTRON MTV-12W1C bylo dosaženo přijatelných výsledků. Hodnoty naměřené na obrazovém výstupu kamery je však nutno přepočítat na hodnoty obrazového signálu CCD snímače, aby bylo dosaženo ekvivalentních výsledků, které lze srovnat s údaji od výrobců. Firma SONY numerickou hodnotu zbytkového signálu za tmy udává totožnou, jako je u snímače CCD151, což jen potvrzuje, že zbytkový signál za tmy je materiálově-technologická vlastnost, která je u většiny obrazových snímačů shodná nebo velmi podobná.

Odhadovaná chyba metodiky měření by se dle mého názoru měla pohybovat v rozmezí 5 – 10%. Měření tedy bylo poměrně přesné. Svou roli může hrát přesnost termostatu, přesnost odečtu hodnot měření signálu použitím kurzorů osciloskopu a u TV kamery i přepočet pomocí přenosu  $K$  do hodnot ekvivalentních obrazovému výstupu CCD snímače. Zde mohou vznikat i velké odchylky od skutečného výstupního signálu snímače.

### 3.5 Měření nástupných a sestupných hran

Délky nástupných a sestupných hran signálu představují rychlost změny úrovně výstupního obrazového signálu (B)CCD snímače na změnu jasové distribuce záření. To ovšem přímo závisí na rozdílech světelného záření, kterých je při měření použito. Měření se tedy zpravidla provádí pro saturační hodnotu osvětlení snímače  $E_{\text{sat}}$  s použitím zkušebních obrazců, které poskytují možnost měřit mezivrcholovou hodnotu signálu stejně, jako např. u měření převodní charakteristiky v kapitole 3.1. Může být použit jak obrazec s bílým pozadím a černými pruhy jako je na obr. 6. b), nebo zkušební obrazec pro měření rozlišovací schopnosti snímače s prostorovým kmitočtem  $f_p$  na obr. 17.

Doba náběžných  $t_r$  a sestupných  $t_f$  hran signálu má vliv i na rozlišení snímače, tedy i na modulační přenosovou charakteristiku snímače. Např. z obr. 19 jasně vyplývá, že s rostoucí vlnovou délkou  $\lambda$  klesá na konstantním prostorovém kmitočtu  $f_p$  rozlišení měřeného snímače. Lze tedy i předpokládat, že s rostoucí vlnovou délkou záření  $\lambda$ , dopadajícího na fotocitlivou vrstvu snímače, poroste i doba trvání hran signálu.

Výrobci CCD snímačů většinou hodnoty doby náběžné a sestupné hrany neuvádějí. Měření však lze ověřit pomocí přibližného vztahu dle literatury [5]

$$t_r = \frac{0,35}{f_{\text{hekv}}}, \quad (4)$$

kde značí  $t_r$  dobu trvání náběžné hrany signálu [s],  
 $f_{\text{hekv}}$  ekvivalentní horní mezní kmitočet [Hz].

Tento vztah ovšem platí přesně pouze pro dolní propusti prvního řádu.

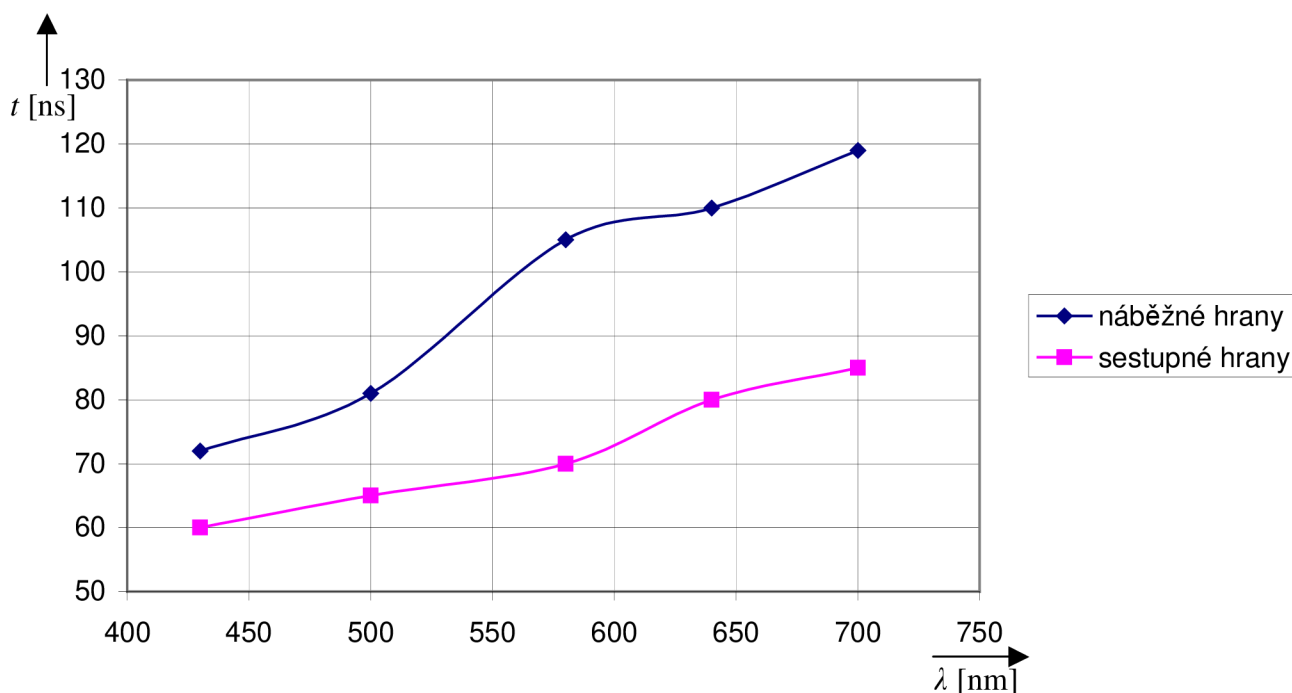
### 3.5.1 Metodika měření plošného CCD snímače

Měření doby nástupných  $t_r$  a sestupných  $t_f$  hran signálu plošného snímače ICX429ALL firmy SONY zabudovaného v TV kameře MINTRON MTV-12W1C probíhalo na pracovišti viz obr. 6 a). Byl použit zkušební obrazec se změnou jasové distribuce pro měření rozlišovací schopnosti na obr. 17. Změna vlnové délky záření byla opět prováděna pomocí barevných filtrů umístěných před objektivem TV kamery. U měření bylo použito barevných filtrů stejných, jako u předchozích měření, tedy v rozmezí vlnových délek viditelného spektra  $\lambda = 430\text{nm}$  až  $\lambda = 700\text{nm}$ .

Před samotným měřením je nutné objektiv TV kamery dokonale zaostřit na zkušební obrazec, jinak by se doby trvání hran výrazně prodlužovaly a měření by nemělo význam. Náběžné a sestupné hrany byly měřeny známým způsobem, tedy doba náběžné hrany  $t_r$  (resp. sestupné hrany  $t_f$ ) od 10% do 90% její celkové velikosti. Naměřené hodnoty uvádí tab. 9. Naměřené průběhy jsou zobrazeny na obr. 26.

**Tab. 9:** Naměřené doby náběžných a sestupných hran plošného snímače ICX429ALL firmy SONY ( $E = E_{\text{sat}}$ ,  $t_{\text{int}} = 20\text{ms}$ ,  $\theta_0 = 25^\circ\text{C}$ ).

$\lambda$ [nm]	430	500	580	640	700
$t_r$ [ns]	72	81	105	110	119
$t_f$ [ns]	60	65	70	80	85



**Obr. 26:** Měření náběžných a sestupných hran plošného snímače ICX429ALL firmy SONY ( $E = E_{\text{sat}}$ ,  $t_{\text{int}} = 20\text{ms}$ ,  $\theta_0 = 25^\circ\text{C}$ ).

Z obr. 26 je patrné, že sestupné hrany jsou oproti náběžným rychlejší. Je ale patrný i teoretický předpoklad, že doby hran s rostoucí vlnovou délkou rostou.

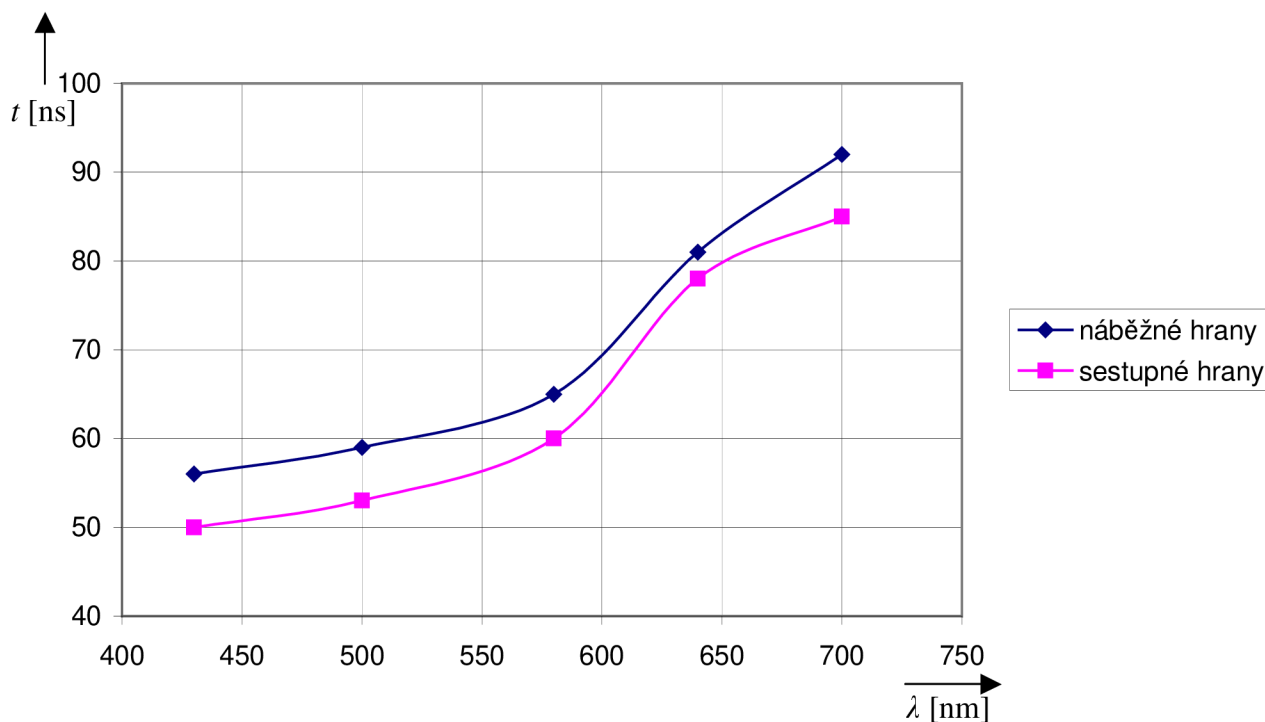
### 3.5.2 Metodika měření řádkového CCD snímače

Měření snímače CCD151 na vývojové desce probíhalo dle principiálního zapojení na obr. 11. Pro měření doby hran byla použita i neprůsvitná destička, neboť použití obrazce pro měření rozlišovací schopnosti nebylo možné. Docházelo k lomu světla na ochranném sklíčku snímače (stejně jako je popsáno v kapitole 3.3.4) a k výraznému prodloužení dob nástupných i sestupných hran. Při použití neprůsvitné destičky bylo dosaženo mnohem rychlejších přechodů.

Barevné filtry byly přikládány přímo na řádkový snímač CCD151. Měření hodnot probíhalo způsobem totožným s uvedeným pro měření plošného snímače. Naměřené hodnoty uvádí tab. 10 s grafickým znázorněním na obr. 27.

**Tab. 10:** Naměřené doby nástupných a sestupných hran řádkového snímače CCD151 firmy Fairchild ( $E = E_{\text{sat}}$ ,  $t_{\text{int}} = 2\text{ms}$ ,  $\theta_0 = 25^\circ\text{C}$ ).

$\lambda$ [nm]	430	500	580	640	700
$t_r$ [ns]	56	59	65	81	92
$t_f$ [ns]	50	53	60	78	85



**Obr. 27:** Měření nástupných a sestupných hran řádkového snímače CCD151 firmy Fairchild ( $E = E_{\text{sat}}$ ,  $t_{\text{int}} = 2\text{ms}$ ,  $\theta_0 = 25^\circ\text{C}$ ).

Vlivem ochranného sklíčka světlocitlivé vrstvy nepochybně došlo k jistému prodloužení doby trvání hran. Skutečné výsledky by tedy měly být ještě lepší, tedy doby hran ještě kratší.

### 3.5.3 Použité přístroje, vybavení

- **TVK** digitální kamera MINTRON MTV-12W1C s měřeným CCD snímačem SONY ICX429ALL,
- **OSC** osciloskop,
- **LXM** luxmetr,
- **MON** monitor (TV přijímač),
- **REF** halogenový reflektor s elektronickým regulátorem napětí,
- vývojová deska se zabudovaným řádkovým snímačem CCD151 firmy Fairchild,
- zkušební obrazec – jasová distribuce vertikálních pruhů s rostoucím horizontálním prostorovým kmitočtem, neprůsvitná destička,
- barevné filtry s udanou vlnovou délkou,
- odpor  $75\Omega$  pro impedanční přizpůsobení,
- propojovací vodiče, rozbočovací „T“ člen.

### 3.5.4 Zhodnocení výsledků

Dle teoretických předpokladů se doby náběžných i sestupných hran s rostoucí vlnovou délkou prodlužují, což bylo měřením potvrzeno. Rovněž doby trvání náběžných hran byly při měření vždy delší, než doby trvání sestupných hran. U plošného snímače ICX429ALL byl tento rozdíl markantnější, než u řádkového snímače CCD151. Potvrdil se i předpoklad, že na měřeném řádkovém snímači by doby trvání hran měly být kratší než na plošném snímači, umístěném v TV kameře, z důvodu většího rozlišení snímače a měření na samotném snímači.

Nepodařilo se mi najít, že by alespoň jeden z výrobců obou snímačů uváděl doby trvání měřených hran. Provedením výpočtu dle přibližného vzorce (4), např. pro vlnovou délku  $\lambda = 700\text{nm}$ , však dostaneme alespoň teoretickou hodnotu doby trvání náběžné hrany. Ta je pro snímač ICX429ALL  $t_r \approx 116\text{ns}$  a pro snímač CCD151  $t_r \approx 60\text{ns}$ . Zatímco u snímače ICX429ALL tato hodnota odpovídá naměřené, u snímače CCD151 se hodnoty liší o 32ns. Takto velkou odchylku způsobuje právě lom světla na ochranném sklíčku snímače. Odstraněním ochranného sklíčka by se zkušební obrazec (příp. neprůsvitná destička) mohl přiložit až na světlocitlivé body. Tím by se tento výrazný rozdíl snížil a bylo by s největší pravděpodobností dosaženo stejné přesnosti, jako u plošného snímače ICX429ALL. Chybu měření bych odhadl do 5%.



## 4 Závěr

Bakalářská práce obsahuje popis základních parametrů obrazových (B)CCD snímačů. U každého parametru je uvedena jeho podstata a veličiny, které ho ovlivňují. Některé veličiny je nutno potlačit (resp. zdůraznit) a to je v určitých případech v dostupných laboratorních podmínkách složité, neboť se jedná o kombinaci poněkud náročných optických a elektronických měření.

V bakalářské práci byly měřeny dva obrazové snímače CCD. Plošný obrazový snímač byl umístěn v černobílé digitální TV kameře, řádkový na vývojové desce výrobce. Metodika měření parametrů byla velmi zjednodušena kvůli absenci složitějších optoelektronických měřicích zařízení a také byla situace komplikována nutností provádět měření i na obrazovém (video) výstupu TV kamery. Všechna prováděná měření tedy byla v podstatě experimentální a měřením byl spíše ověřen předpoklad, že parametry obrazového snímače lze na základě zjednodušujících předpokladů s dostupným laboratorním vybavením měřit na jeho obrazovém výstupu a po určité úpravě metodiky i na obrazovém (video) výstupu TV kamery. Srovnáním naměřených údajů obou snímačů s teoretickými, udávanými výrobcí, bylo možné u většiny měření stanovit i přesnost, resp. chybu, se kterou bylo měření prováděno, což umožnilo i diskusi dosažených výsledků a alespoň částečné určení míry jejich relevance.

## Seznam literatury

- [1] KADLEC, O.: *Historie digitální fotografie*. FI MU [online]. [cit. 20.12.2008]  
Dostupné z: <<http://www.fi.muni.cz/usr/jkucera/pv109/2004/xkadlec2.htm>>
- [2] ŘÍČNÝ, V.: *Videotechnika*. Skriptum. Brno: VUT, 2006. 135 s. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. ISBN 80-214-3225-X
- [3] HANUS, S.: *Optoelektronické měniče*. Přednáška. Brno: VUT, 2008. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [4] ŘÍČNÝ, V.: *Measurement of the geometrical distortions of TV cameras*. In.: *Proceeding of 7th National Scientific Conference Radioelektronika 97*, STU, Bratislava, Slovak Republic, April 23.-24., 1997. ISBN 80-227-0943-3
- [5] ŘÍČNÝ, V.: *Vlastnosti a využití řádkových světlocitlivých snímačů CCD*. Knižnice odborných a vědeckých spisů VUT v Brně. Brno: VUT, 1990. 116 s. Fakulta elektrotechnická. ISBN 80-214-0222-9
- [6] LORAL FAIRCHILD CCD IMAGING DATABOOK: *CCD Sensors, Systems & Developmental Technology*. Milpitas: Loral Fairchild Imaging Sensors, 1995. 344 s.

## Seznam použitých zkratek

$A_s$	zářivá energie
BCCD	Burried CCD
CCD	Charge Coupled Device
$E$	spektrální hustota záření
$E_{\text{sat}}$	saturační osvětlení
$f_{\text{hekv}}$	ekvivalentní horní mezní kmitočet
FIT	Frame Inter Line Transfer
$f_P$	prostorový kmitočet
FT	Frame Transfer
HD	High Definition
IT	Inter Line Transfer
$K$	napěťový přenos
$l$	vzdálenost
LXM	luxmetr
MIS	Metal Insulator Semiconductor
MON	monitor
MTF	Modulation Transfer Function
OSC	osciloskop
$Q$	náboj
$q_1$	nábojové kvantum
$q_n$	náboj v registru délky $n$
REF	halogenový reflektor
RGB	Red, Green, Blue
$S$	spektrální citlivost snímače
$t_a$	doba akumulace náboje
$t_{\text{ař}}$	aktivní doba řádku
TERM	termostat
$t_f$	doba trvání sestupné hrany
$t_{\text{int}}$	doba integrace
$t_r$	doba trvání náběžné hrany
$t_{\text{sat}}$	doba vzniku saturace
TV	televizní
TVK	televizní kamera
$U_{\text{CCDo}}$	výstupní obrazový signál CCD snímače
$U_{\text{CCDsatsat}}$	saturační napětí na obrazovém výstupu CCD snímače
$U_{\text{DS}}$	zbytkový signál za tmy
$U_{\text{DSDC}}$	stejnosečná složka zbytkového signálu za tmy
$U_{\text{DSLFL}}$	nízkofrekvenční složka zbytkového signálu za tmy
$U_F$	napětí na fotoelektrodě
$U_o$	výstupní obrazový signál
$U_{\text{oh}}$	výstupní obrazový signál pro nejnižší hodnotu prostorového kmitočtu
$U_{\text{oi}}$	výstupní obrazový signál $i$ -tého vzorku
$U_{\text{omax}}$	maximální hodnota výstupního obrazového signálu
$U_{\text{oR}}$	výstupní obrazový signál v relativní míře
$U_{\text{oRmax}}$	maximální hodnota výstupního obrazového signálu v relativní míře
$U_r$	souhrnný rušivý signál
$U_{\text{sat}}$	saturační obrazové napětí
$U_{\xi}$	šumový signál

$U_T$	řídící signál
$U_{Tvo}$	výstupní obrazový signál TV kamery
$U_{Tvsat}$	saturační napětí na obrazovém výstupu TV kamery
$U_X$	napětí na transportní elektrodě
$\eta_q^{n,m}$	účinnost nábojového kvanta registru délky $n$ řízeného $m$ fázovým taktováním
$\theta_0$	teplota snímače
$\theta_P$	pracovní teplota
$\lambda$	vlnová délka