

Fyzikální praktikum 3 - úloha 1

Studium činnosti fotonásobiče

Teorie: Úkolem tohoto praktika bylo, jak název napovídá, prostudovat chování fotonásobiče. Fotonásobič je elektro-optický přístroj používaný především pro měření nízkých světelných toků. Využívá dvou druhů elektronové emise, fotoemise a sekundární emise.

Fotoemise bývá nazývána též vnějším fotoefektem. Její podstatou je přeměna energie fotonu na výstupní práci a kinetickou energii elektronu. Platí pro ni několik zákonů, například Einsteinův zákon

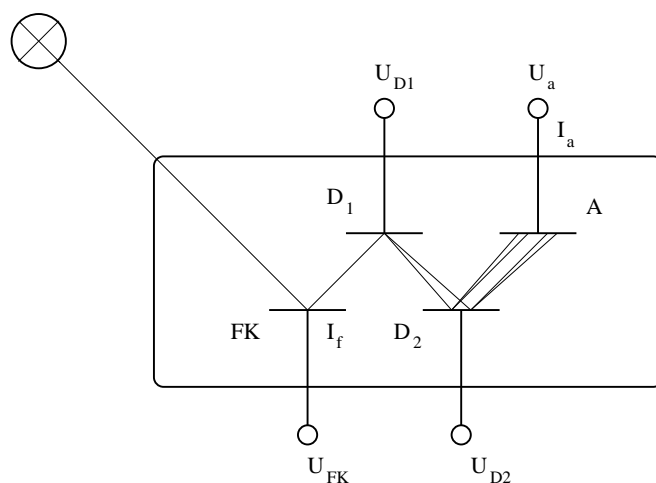
$$h\nu = \omega + \frac{mv_0^2}{2},$$

kde $h\nu$ je energie fotonu a ω efektivní výstupní práce elektronů. Z toho vyplývá, že od určitých frekvencí platí, že elektrony z materiálu nezískávají potřebnou kinetickou energii. Z toho vyplývá další zákon, který říká, že rychlost elektronů z fotokatody nezávisí na intenzitě světla.

Dalším zákonem je zákon Stoletovův, který říká, že počet elektronů emitovaných za jednotku času je úměrný intenzitě dopadajícího světla. To ovšem platí za předpokladu, že spektrální složení světla je nezměněné. Můžeme tedy psát $I_f = k(\lambda)\Phi$.

Pokud urychlené elektrony dopadnou na další elektrodu, mohou, pokud mají dostatečnou energii, uvolnit další elektrony. Tyto nové elektrony se pak nazývají sekundární. Zavádí se pak „koeficient sekundární emise“ $\sigma = \frac{I_{sek}}{I_{prim}}$.

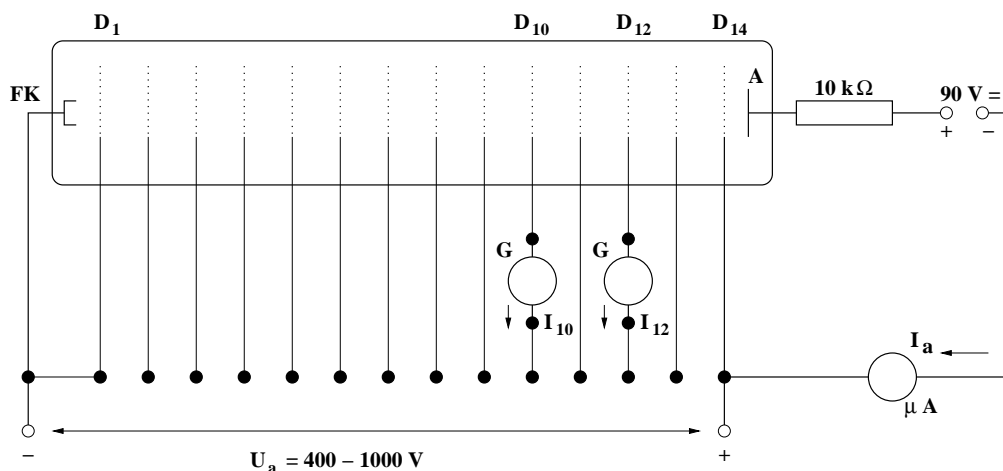
Princip fotonásobiče:



Z obrázku by mohlo být zřejmé, jak fotonásobič pracuje. Po dopadu fotonu se vybudí elektron, který projde na další elektrodu (tzv. dynodu). Tam vybudí další elektrony atd. Pomocí Stoletovova zákona můžeme určit proud anodou ze vztahu $I_a = \sigma^n I_f$. Koeficient $\sigma^n = M$ nám udává celkové zesílení fotonásobiče. Dosazením předchozích vztahů získáme tedy $I_a = Mk\Phi = S\phi$, kde S je integrální citlivost fotonásobiče. Obecně zesílení a integrální citlivost závisí na anodovém napětí, čímž určují vlastnosti fotonásobiče.

I pokud není fotokatoda osvětlena, můžeme naměřit nějaký proud. Tento tzv. temný proud vzniká termoemisí z fotokatody a je možné jej potlačit lepším chlazením.

Popis měření:



Na obrázku je schematický náčrt aparatury použité v tomto praktiku. Většina dynod je zapojena trvale. Kvůli určení koeficientu sekundární emise je mezi dvěma katodami a napěťovým děličem mikroampérmetr.

Pro určitou hodnotu osvětlení fotokatody jsou odečítány proudy na anodě a 10. a 12. dynodě a napětí mezi fotokatodou a 14. dynodou. Z těchto údajů je možné zjistit všechny potřebné údaje, tedy závislost $\ln \frac{\sigma}{V}$ na U_a , závislost integrální citlivosti a zesílení fotonásobiče na U_a a integrální citlivost fotokatody. Zároveň je možné ověřit vliv temného proudu na přesnost měření.

Vlastní měření: V následující tabulce jsou uvedeny naměřené a vypočtené hodnoty podle vzoru uvedeného v návodu.

| Klín č. 1: $\Phi = 0,9 \cdot 10^{-4}(Lm)$ | | | | | | | | | | |
|---|----------------------|-------------------------|-------------------------|----------|-----------------------------|------------------------|---------|-----------------------|---------------|---------------------------|
| U_a (V) | I_a (μA) | I_{10} (μA) | I_{12} (μA) | σ | $V = \frac{U_a}{14}$ (V) | $\ln \frac{\sigma}{V}$ | M | S (ALm^{-1}) | I_f (pA) | k (μALm^{-1}) |
| 600 | 59 | 1,11 | 7,50 | 2,6 | 42,86 | -2,8 | 642936 | 0,656 | 91,8 | 1,02 |
| 594 | 50 | 1,04 | 6,78 | 2,55 | 42,43 | -2,81 | 500466 | 0,556 | 99,9 | 1,11 |
| 540 | 28 | 0,58 | 3,22 | 2,36 | 38,57 | -2,80 | 162553 | 0,311 | 172,3 | 1,91 |
| 582 | 40 | 0,90 | 5,67 | 2,51 | 41,57 | -2,81 | 393898 | 0,444 | 101,5 | 1,13 |
| 510 | 20 | 0,38 | 1,85 | 2,21 | 36,43 | -2,80 | 64821 | 0,222 | 308,5 | 3,43 |
| 480 | 11 | 0,27 | 1,10 | 2,02 | 34,29 | -2,83 | 18630 | 0,122 | 590,5 | 6,56 |
| 624 | 71 | 1,31 | 9,05 | 2,63 | 44,57 | -2,83 | 751001 | 0,789 | 94,5 | 1,05 |
| 642 | 85 | 1,54 | 11,3 | 2,71 | 45,86 | -2,83 | 1145260 | 0,944 | 74,2 | 0,83 |
| 636 | 79 | 1,50 | 10,90 | 2,70 | 45,43 | -2,82 | 1069909 | 0,878 | 73,8 | 0,82 |
| 654 | 89 | 1,60 | 12,40 | 2,78 | 46,71 | -2,82 | 1679237 | 0,989 | 53,0 | 0,59 |

Klín č. 2: $\Phi = 0,68 \cdot 10^{-4}(Lm)$

| U_a (V) | I_a (μA) | I_{10} (μA) | I_{12} (μA) | σ | $V = \frac{U_a}{14}$ (V) | $\ln \frac{\sigma}{\bar{v}}$ | M | S (ALm^{-1}) | I_f (pA) | k (μALm^{-1}) |
|--------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|----------|-----------------------------|------------------------------|---------|-----------------------|---------------|---------------------------|
| 648 | 79 | 1,40 | 10,7 | 2,76 | 46,29 | -2,82 | 1523317 | 1,170 | 52,2 | 0,77 |
| 654 | 88 | 1,47 | 10,9 | 2,72 | 46,71 | -2,84 | 1232435 | 1,290 | 71,4 | 1,05 |
| 630 | 68 | 1,20 | 8,7 | 2,69 | 45,00 | -2,82 | 1052849 | 1,000 | 64,6 | 0,95 |
| 618 | 60 | 1,12 | 7,8 | 2,64 | 44,14 | -2,82 | 794577 | 0,882 | 75,5 | 1,11 |
| 606 | 51 | 1,00 | 6,6 | 2,57 | 43,29 | -2,82 | 545516 | 0,750 | 93,5 | 1,37 |
| 582 | 39 | 0,88 | 4,8 | 2,34 | 41,57 | -2,88 | 143651 | 0,574 | 271,5 | 3,99 |
| 564 | 31 | 0,62 | 3,5 | 2,38 | 40,29 | -2,83 | 182698 | 0,449 | 166,9 | 2,46 |
| 522 | 20 | 0,40 | 2,0 | 2,24 | 37,29 | -2,81 | 78125 | 0,294 | 256,0 | 3,76 |
| 432 | 10 | 0,10 | 0,4 | 1,90 | 30,86 | -2,79 | 7836 | 0,147 | 1276,0 | 18,80 |
| 618 | 45 | 0,92 | 5,90 | 2,53 | 44,14 | -2,86 | 446117 | 0,654 | 99,8 | 1,47 |

Klín č. 3: $\Phi = 0,52 \cdot 10^{-4}(Lm)$

| U_a (V) | I_a (μA) | I_{10} (μA) | I_{12} (μA) | σ | $V = \frac{U_a}{14}$ (V) | $\ln \frac{\sigma}{\bar{v}}$ | M | S (ALm^{-1}) | I_f (pA) | k (μALm^{-1}) |
|--------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|----------|-----------------------------|------------------------------|---------|-----------------------|---------------|---------------------------|
| 666 | 88 | 1,52 | 11,7 | 2,77 | 47,57 | -2,84 | 1601017 | 1,690 | 55,0 | 1,06 |
| 660 | 77 | 1,37 | 10,0 | 2,70 | 47,14 | -2,86 | 1103967 | 1,480 | 69,8 | 1,34 |
| 648 | 71 | 1,26 | 9,0 | 2,67 | 46,29 | -2,85 | 948645 | 1,360 | 74,3 | 1,43 |
| 630 | 60 | 1,09 | 7,5 | 2,62 | 45,00 | -2,84 | 730202 | 1,150 | 82,2 | 1,58 |
| 618 | 50 | 0,94 | 6,2 | 2,57 | 44,14 | -2,84 | 543059 | 0,962 | 92,1 | 1,77 |
| 594 | 40 | 0,79 | 4,8 | 2,46 | 42,43 | -2,85 | 305702 | 0,769 | 130,8 | 2,52 |
| 570 | 30 | 0,63 | 3,7 | 2,42 | 40,71 | -2,82 | 241006 | 0,577 | 124,5 | 2,36 |
| 540 | 21 | 0,41 | 2,1 | 2,26 | 38,57 | -2,84 | 92480 | 0,394 | 221,7 | 4,26 |
| 438 | 10 | 0,11 | 0,4 | 1,91 | 31,29 | -2,80 | 8408 | 0,192 | 1189,0 | 22,90 |
| 666 | 83 | 1,50 | 11,3 | 2,74 | 47,57 | -2,85 | 1376925 | 1,600 | 60,3 | 1,16 |

Klín č. 5: $\Phi = 0,34 \cdot 10^{-4}(Lm)$

| U_a (V) | I_a (μA) | I_{10} (μA) | I_{12} (μA) | σ | $V = \frac{U_a}{14}$ (V) | $\ln \frac{\sigma}{\bar{v}}$ | M | S (ALm^{-1}) | I_f (pA) | k (μALm^{-1}) |
|--------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|----------|-----------------------------|------------------------------|---------|-----------------------|---------------|---------------------------|
| 684 | 90 | 1,57 | 12,2 | 2,79 | 48,86 | -2,86 | 1710887 | 2,65 | 52,6 | 1,55 |
| 678 | 84 | 1,49 | 11,5 | 2,78 | 48,43 | -2,86 | 1631477 | 2,47 | 51,5 | 1,51 |
| 660 | 77 | 1,34 | 9,9 | 2,72 | 47,14 | -2,85 | 1201470 | 2,26 | 64,1 | 1,88 |
| 654 | 72 | 1,26 | 9,2 | 2,70 | 46,71 | -2,85 | 1106422 | 2,12 | 65,1 | 1,91 |
| 642 | 65 | 1,16 | 8,2 | 2,66 | 45,86 | -2,85 | 882046 | 1,91 | 73,7 | 2,17 |
| 630 | 58 | 1,09 | 7,4 | 2,61 | 45,00 | -2,85 | 664717 | 1,71 | 87,3 | 2,57 |
| 618 | 51 | 0,97 | 6,4 | 2,57 | 44,14 | -2,84 | 544324 | 1,50 | 93,7 | 2,76 |
| 600 | 40 | 0,80 | 5,1 | 2,52 | 42,86 | -2,83 | 427919 | 1,16 | 92,3 | 2,71 |
| 570 | 31 | 0,62 | 3,5 | 2,38 | 40,71 | -2,84 | 182698 | 0,91 | 169,7 | 4,99 |
| 540 | 21 | 0,42 | 2,1 | 2,24 | 38,57 | -2,85 | 78125 | 0,62 | 268,8 | 7,91 |
| 504 | 16 | 0,26 | 1,2 | 2,15 | 36,00 | -2,82 | 44612 | 0,47 | 358,6 | 10,50 |

Klín č. 7: $\Phi = 0,21 \cdot 10^{-4} (Lm)$

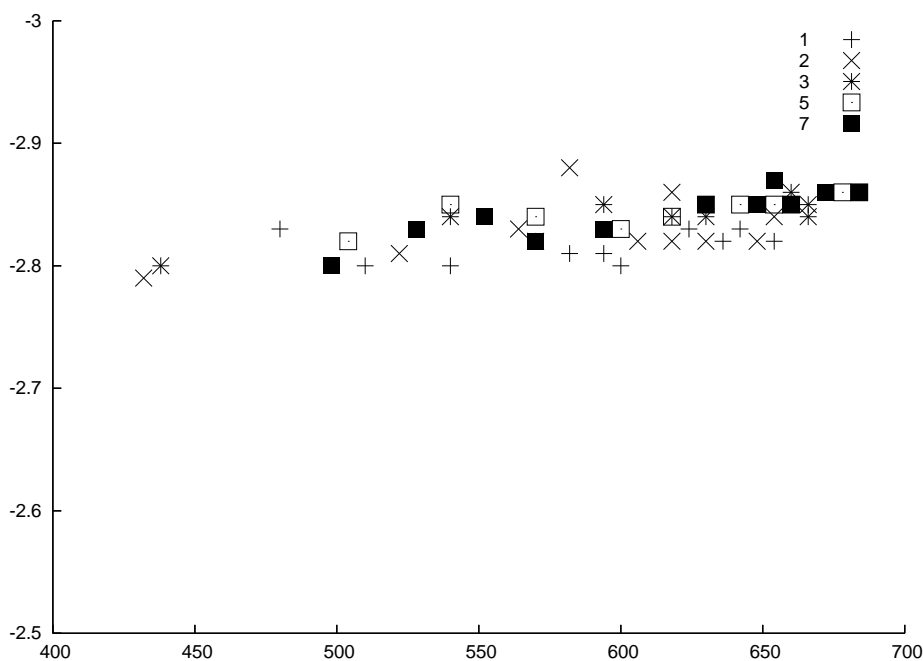
| U_a (V) | I_a (μA) | I_{10} (μA) | I_{12} (μA) | σ | $V = \frac{U_a}{14}$ (V) | $\ln \frac{\sigma}{V}$ | M | S (ALm^{-1}) | I_f (pA) | k (μALm^{-1}) |
|--------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|----------|-----------------------------|------------------------|---------|-----------------------|---------------|---------------------------|
| 684 | 89 | 1,52 | 12,0 | 2,81 | 48,86 | -2,86 | 1911453 | 4,24 | 47 | 2,22 |
| 672 | 81 | 1,38 | 10,4 | 2,75 | 48,00 | -2,86 | 1380638 | 3,86 | 59 | 2,79 |
| 660 | 75 | 1,26 | 9,3 | 2,72 | 47,14 | -2,85 | 1193402 | 3,57 | 63 | 2,99 |
| 654 | 69 | 1,20 | 8,5 | 2,66 | 46,71 | -2,87 | 894672 | 3,29 | 77 | 3,67 |
| 648 | 64 | 1,15 | 8,2 | 2,67 | 46,29 | -2,85 | 937156 | 3,05 | 68 | 3,25 |
| 630 | 59 | 1,06 | 7,2 | 2,61 | 45,00 | -2,85 | 667093 | 2,81 | 88 | 4,21 |
| 630 | 52 | 1,04 | 7,0 | 2,59 | 45,00 | -2,85 | 625825 | 2,48 | 83 | 3,96 |
| 594 | 42 | 0,82 | 5,1 | 2,49 | 42,43 | -2,83 | 359993 | 2,00 | 117 | 5,56 |
| 570 | 32 | 0,63 | 3,7 | 2,42 | 40,71 | -2,82 | 241006 | 1,52 | 133 | 6,32 |
| 552 | 27 | 0,56 | 3,0 | 2,31 | 39,43 | -2,84 | 126629 | 1,29 | 213 | 10,20 |
| 528 | 22 | 0,42 | 2,1 | 2,24 | 37,71 | -2,83 | 78125 | 1,05 | 282 | 13,40 |
| 498 | 16 | 0,28 | 1,3 | 2,15 | 35,57 | -2,80 | 46505 | 0,76 | 344 | 16,40 |

Ověření vlivu temného proudu na přesnost měření:

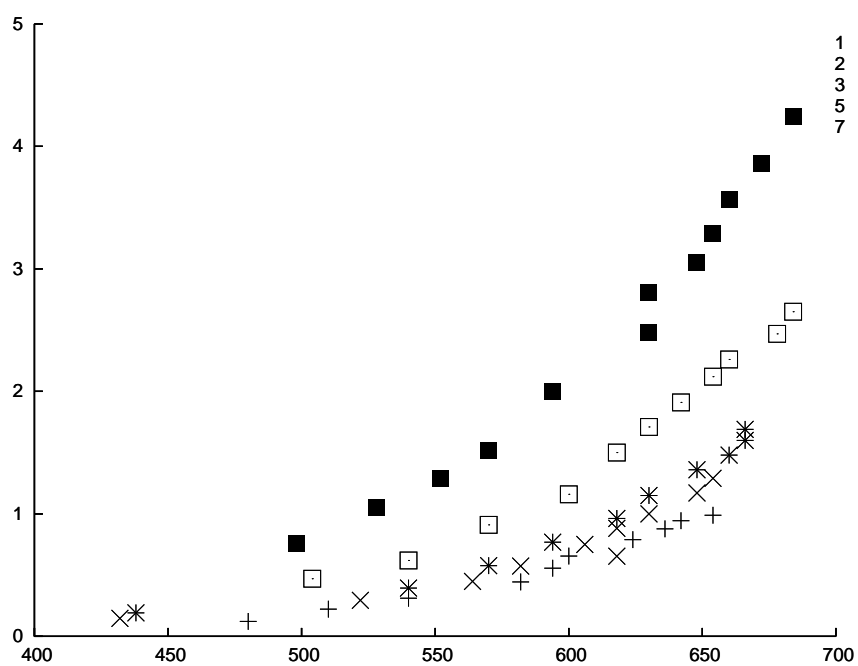
| Temný proud | | | |
|--------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|
| U_a (V) | I_a (μA) | I_{10} (μA) | I_{12} (μA) |
| 642 | 5,5 | 0,01 | 0,08 |

Je vidět, že vliv temného proudu je minimální, proto nebude na něho prováděna oprava.

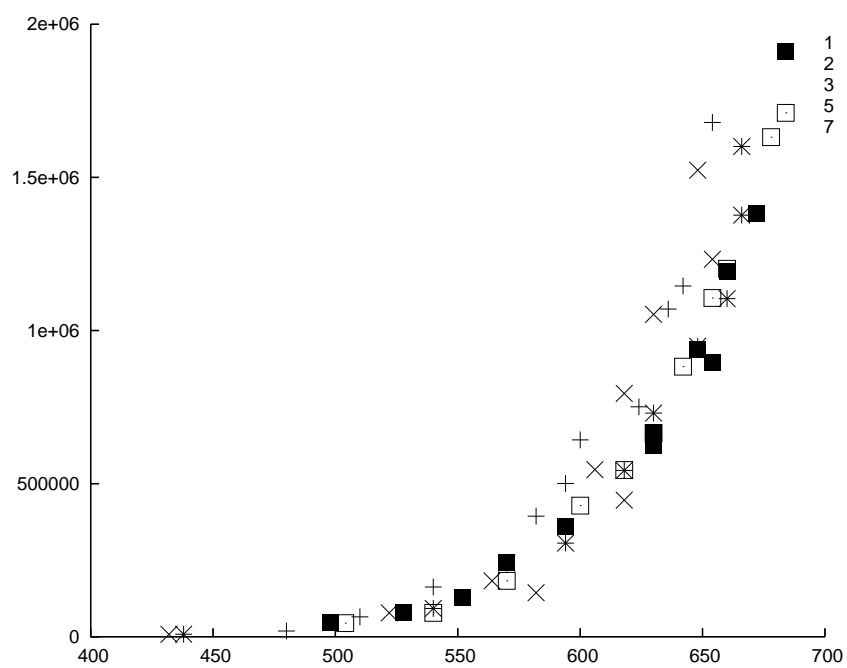
Graf závislosti $\ln \frac{\sigma}{V}$ na U_a



Graf závislosti S na U_a



Graf závislosti M na U_a



Ověření nezávislosti koeficientu sekundární emise σ na intenzitě osvětlení fotokatody

| $U = 630V$ | | | |
|--------------------------|-----------------|-----------------|----------|
| $\Phi(\cdot 10^{-4} Lm)$ | $I_{10}(\mu A)$ | $I_{12}(\mu A)$ | σ |
| 0,9 | 1,70 | 11,9 | 2,65 |
| 0,68 | 1,49 | 10,3 | 2,63 |
| 0,52 | 1,35 | 9,3 | 2,62 |
| 0,42 | 1,29 | 8,9 | 2,63 |
| 0,34 | 1,23 | 8,5 | 2,63 |
| 0,27 | 1,14 | 7,8 | 2,62 |
| 0,21 | 1,10 | 7,5 | 2,61 |
| 0,16 | 1,04 | 7,2 | 2,63 |

Závěr: Z prvního grafu je vidět, že pro libovolnou hodnotu světelného toku je grafem nějaká konstanta. To by mohlo napovídat, že koeficient sekundární emise σ nebude záviset na světelném toku. Z tabulky, kde toto bylo zjišťováno, je vidět, že tomu tak opravdu je. Odchylka je v řádu 0,7%, což je velmi pěkné.

Pokud se podíváme přesněji, grafem není konstanta, ale rostoucí přímka, i když rostoucí velmi pomalu. To lze přičíst temnému proudu, který byl zanedbáván. I tak ale je shoda výsledků s teorií dobrá a možná by šlo chybu vysvětlit pomocí chyby měřících přístrojů.

Graf pro zesílení zhruba odpovídá teorii, kdy se předpokládá závislost typu $\sigma = AVe^{BV}$. Zesílení M je pak jen nějaká mocnina σ , v našem případě čtrnáctá. Je vidět, že zesílení je pro dané napětí zhruba stejné pro libovolný světelný tok, což jen potvrzuje teorii o nezávislosti σ na Φ .

Z posledního grafu je vidět, že pro zmenšující se světelný tok a zvyšující se anodové napětí se zvětšuje integrální citlivost fotonásobiče. To, že se citlivost zvětšuje se zvyšujícím se napětím, lze snadno vysvětlit tak, že elektrony jsou urychlovány větším potenciálem, tedy získávají větší energii, takže je větší pravděpodobnost doletu na další anodu.

Měření proběhlo v pořádku bez žádných problémů.