



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

MĚŘENÍ RADIOAKTIVNÍHO ZÁŘENÍ

MEASUREMENT OF RADIOACTIVE RADIATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

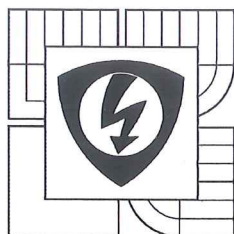
Markéta Dyntarová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Milan Chmelař, CSc.

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav biomedicínského inženýrství

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Biomedicínská technika a bioinformatika

Student: Markéta Dyntarová

Ročník: 3

ID: 155568

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Měření radioaktivního záření

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1) Prostudujte problematiku radioaktivity, druhů záření a jejich vlastnosti a možnosti detekce radioaktivního záření. 2) Popište používané detektory, jejich principy a vlastnosti. Podrobněji popište plynem plněné detektory. 3) Navrhněte blokové schéma detektoru záření s využitím plynem plněného detektoru a popište dílčí bloky s ohledem na jejich požadované vlastnosti. 4) Navrhněte indikátor záření s Geiger-Mullerovou trubicí. Detektor má na záření upozorňovat akustickým signálem a má mít i výstup na digitální ukazatel s LCD displejem. Napájení je bateriové s indikátorem vybité baterie. 5) Indikační část přístroje (bez ukazatele) realizujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] HÁLA J. Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie, BEN 2002, ISBN 80-85615-56-8.
[2] HÁLA J. Radioaktivní izotopy., SURSUM 2013, ISBN 978-80-7323-248-1.

Termín zadání: 8. 2. 2016

Termín odevzdání: 27.5.2016

Vedoucí práce: doc. Ing. Milan Chmelař, CSc.

Konzultanti bakalářské práce:

prof. Ing. Ivo Provazník, Ph.D.
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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt:

Teoretická část této Bakalářské práce na téma Měření radioaktivního záření popisuje některé znalosti z oblasti problematiky radioaktivity a zabývá se detekcí ionizujícího záření. Stručně seznamuje čtenáře s druhy ionizujícího záření, jejich biologických účinků a možnostmi ochrany. Dále práce obsahuje popis detektorů pevné fáze. Podrobnější popis je věnován principu detekce plynem plněných detektorů. Praktická část práce se zaměřuje na návrh indikátoru ionizujícího záření s využitím GM trubice a realizaci indikační části přístroje.

Klíčová slova:

Radioaktivita, ionizující záření, scintilační detektory, polovodičové detektory, filmové detektory, termoluminiscenční detektory, ionizační komora, proporcionální detektory, Geiger-Müllerovy detektory

Abstract:

The theoretical part of this Bachelor thesis, „The measurement of ionizing radiation”, is devoted to certain knowledge of radiation. It is concerned with problems of ionizing radiation detection, sorts of ionizing radiation are described shortly together with its influences on human organism and with abilities of organism protection. Thesis also contains description of solid phase detectors of ionizing radiation with detailed description of gas filled detectors. The practical part of this Bachelor thesis is focused on designing of radiation detector with GM counter and realization of indication part device.

Keywords:

Radioactivity, ionizing radiation, scintillation detectors, semiconductor detectors, film detectors, thermoluminescent detectors, ionization chamber, proportional counters, Geiger-Müller detectors

DYNTAROVÁ, M. Měření radioaktivního záření. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 81s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Milan Chmelař, CSc..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma *Měření radioaktivního záření* jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího semestrální 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 autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma 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

.....

Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Milanu Chmelařovi, CSc. za účinnou metodiku a pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....

Podpis autora

Obsah

Seznam obrázků	8
1 Úvod.....	10
2 Radioaktivita.....	11
2.1 Charakteristika ionizujícího záření	11
2.2 Druhy ionizujícího záření.....	11
2.3 Jednotky ionizujícího záření.....	14
2.4 Biologické účinky ionizujícího záření	16
2.5 Ochrana před ionizujícím zářením	16
3 Detektory ionizujícího záření.....	19
3.1 Rozdělení přístrojů pro měření ionizujícího záření	19
4 Detektory pevné fáze.....	20
4.1 Scintilační detektor	20
4.2 Polovodičový detektor	20
4.3 Filmové dozimetry	21
4.4 Termoluminiscenční detektory (TL detektory)	21
5 Plynem plněné detektory	23
5.1 Ionizační komora	24
5.2 Proporcionální detektory	25
5.3 Geiger-Müllerovy detektory (GM detektory)	26
6 Návrh blokového schématu detektoru záření s využitím GM trubice... 31	
6.1 Blokové schéma	31
6.2 Popis jednotlivých bloků	31
7 Návrh měniče pro napájení GM trubice.....	35

7.1	Volba zapojení.....	35
7.2	Požadavky.....	35
7.3	Principiální popis činnosti.....	36
7.4	Návrh impulzového transformátoru	39
7.5	Volba ostatních součástek	45
7.6	Výpočet součástek	46
8	Vyhodnocovací část.....	49
8.1	Požadavky.....	49
8.2	Principiální popis činnosti.....	50
8.3	Volba součástek.....	51
8.4	Výpočet součástek	53
9	Odhad spotřeby proudu	60
10	Napájecí zdroj.....	61
10.1	Principiální popis činnosti.....	61
10.2	Volba součástek	62
10.3	Výpočet součástek	64
11	Realizace.....	68
12	Závěr.....	70
	Použitá literatura	71
	Seznam symbolů a zkratek.....	76
	Seznam příloh	78

Seznam obrázků

Obr. 2-1 Emise alfa částice z jádra atomu [25]	12
Obr. 2-2 Emise beta částice z jádra atomu [25]	12
Obr. 2-3 Emise z vysokoenergetické vlny z jádra atomu [25]	13
Obr. 2-4 Spektrum RTG záření	13
Obr. 2-5 Emise vysoké energetické vlny z elektronového obalu atomu [25]	14
Obr. 2-6 Emise neutronu z jádra atomu [25]	14
Obr. 2-7 Pronikavost jednotlivých druhů ionizujícího záření [25]	17
Obr. 4-1 Scintilační sonda	20
Obr. 4-2 Luminiscence	22
Obr. 4-3 Celotělový osobní dozimetr OSL a prstový dozimetr TL [32] [33]	22
Obr. 5-1 Voltampérová charakteristika	23
Obr. 5-2 Tvary ionizačních komor	24
Obr. 5-3 Princip ionizační komory	24
Obr. 5-4 Lavina ionizace	25
Obr. 5-5 Porovnání velikosti proudových impulzů [14]	26
Obr. 5-6 GM trubice [11]	26
Obr. 5-7 Pracovní charakteristika GM trubice	27
Obr. 5-8 Řez GM trubicí	28
Obr. 5-9 Mrtvá doba GM trubice	29
Obr. 6-1 Blokové schéma	31
Obr. 6-2 GM trubice STS-5 [34]	31
Obr. 6-3 Rozměry GM trubice STS-5	32
Obr. 6-4 Pracovní charakteristika GM trubice STS-5	32
Obr. 7-1 Návrh DC-DC měniče 390V	36

Obr. 7-2 Integrovaný obvod MC34063A [39]	37
Obr. 7-3 Pilovitý napětový průběh vytvořený na kondenzátoru C9	37
Obr. 7-4 Impulzy vznikající při vniku ionizujícího záření do GM trubice.....	38
Obr. 7-5 Princip činnosti blokujícího měniče	39
Obr. 7-6 Schéma použité cívky (užitečná plocha okénka je vyšrafována)	44
Obr. 7-7 Schéma zjednodušeného napětového děliče	46
Obr. 7-8 Schéma navrhnutého napětového děliče	48
Obr. 8-1 Návrh vyhodnocovací části přístroje	50
Obr. 8-2 Impulzy spouštějící tranzistor T2	50
Obr. 8-3 Impulzy vycházející z monostabilního klopného obvodu	51
Obr. 8-4 Monostabilní klopný obvod s časovačem 555	53
Obr. 8-5 Proudový zesilovač	55
Obr. 8-6 Schéma zapojení DCP	56
Obr. 8-7 Schéma OZ TLC271	58
Obr. 10-1 Návrh schématu napájení přístroje	61
Obr. 10-2 Nabíjecí AA baterie značky Ansmann [51]	62
Obr. 10-3 Schéma napětového děliče (součást indikace vybité baterie)	64
Obr. 10-4 Schéma děliče (nahrazení trimru zkratem)	65
Obr. 11-1 Realizace zařízení (pohled shora)	68
Obr. 11-2 Realizace zařízení (pohled zdola)	68
Obr. 11-3 GM trubice J302	69
Obr. 11-4 GM trubice STS-5 v ochranném obalu	69

1 Úvod

Ionizující záření je zrádné v tom, že jej přímo smysly nevnímáme. Pokud jsme mu vystaveni trvale, pak se jeho vliv na organismus projeví až po určité době. Biologické a lékařské poznatky o účincích ionizujícího záření jsou získávány již od počátku tohoto století a v současné době jsou sice rozsáhlé, ale dosud ne úplné. Změny v organismu vyvolané ionizujícím zářením se mohou u různých jedinců projevit různě. Právě s ohledem na vlastnosti ionizujícího záření a neschopnost organismu jej přímo odhalit jsou důležité různé metody jeho detekce, které umožňují lidem se před nebezpečnými účinky záření chránit. Ionizující záření však nemusí být jenom hrozbou. V lékařství je využíváno jak v diagnostice, tak i v terapii. Tato bakalářská práce je zaměřena na metody jeho detekce.

2 Radioaktivita

Atomy stejného prvku, které jsou složeny ze stejného počtu protonů, ale s různým počtem neutronů, nazýváme izotopy. Izotopy mají stejné chemické vlastnosti, ale odlišují se ve vlastnostech jaderných. Rozdělují se na stabilní a nestabilní. Jádra stabilních izotopů jsou neměnná po libovolně dlouhou dobu. Jádra nestabilních izotopů mají nadbytek energie. Samovolně se přeměňují na jádra jiná, za účelem snížit energii, a tím získat stabilitu. Tento samovolný děj je označován jako **radioaktivita**, při kterém se uvolňuje neviditelné záření, které se nazývá **ionizující záření**. Čím více jader se za vteřinu přeměňuje, tím je větší radioaktivita, a tím látka do svého okolí vysílá intenzivnější ionizující záření. **Aktivita A** zářiče vyjadřuje počet radioaktivních přeměn za jednu sekundu. Jednotkou je becquerel (*Bq*).

Nejvíce jsme vystaveni **radioaktivitě přirozené**. Jsou to přirozené zdroje ionizujícího záření, které se vyskytují v přírodě. **Radioaktivita umělá** je připravena činností člověka. [2] [4] [8] [9] [23] [24]

2.1 Charakteristika ionizujícího záření

Ionizující záření vytvářejí nestabilní atomy, které se snaží získat stabilitu. Stabilní stav získají vyzařením hmotných částic nebo fotonů elektromagnetického záření. Tento tok záření má schopnost ionizovat a excitovat absorbující prostředí. Při **excitovaných stavech** elektrony atomů prostředí obsazují vyšší energetické hladiny. Když dojde k **ionizaci**, vyrazí se úplně elektrony z atomů prostředí.

Kromě **jaderného záření** vznikající při radioaktivních přeměnách, je také důležitou skupinou **záření nejaderné**, které vzniká v elektronovém obalu atomu. Do skupiny jaderného záření lze zařadit částice alfa (α), částice beta (β), záření gama (γ) a neutrony. Rentgenové záření a částice urychlené v urychlovačích patří mezi záření nejaderné.

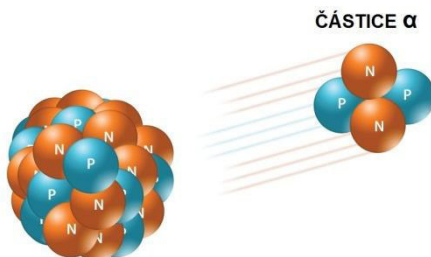
Záření lze rozdělit na **přímo ionizující**, které se sestává z proudu nabitých částic (α , β částice) a na **nepřímo ionizující**, které způsobují elektricky neutrální částice (záření γ , záření brzdné, neutrony). Přímo ionizující záření vyvolává ionizaci při průchodu látkou okamžitě. Nepřímo ionizující záření ionizuje prostředí vznikem sekundárních elektronů. [2] [8] [23]

2.2 Druhy ionizujícího záření

2.2.1 Záření alfa (záření α)

Záření α je korpuskulární. Jeho částice se skládají ze dvou protonů a dvou neutronů. Jedná se tedy o kladně nabitá jádra helia (viz obr. 2-1), které vznikají přeměnou těžkých jader. Energetické spektrum α záření je čárové, protože částice α mají jen několik možných hodnot energie. Tyto částice při průchodu prostředím silně ionizují a excitují. Jejich dosah je

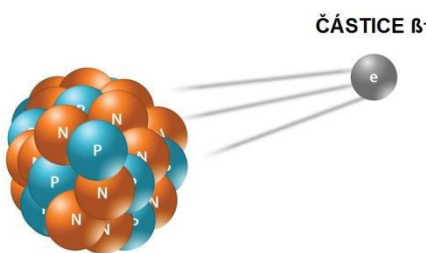
ale krátký, protože velmi rychle ztrácí svoji energii. Vnější ozáření nás neohrozí, ale nebezpečné je především vpravení α zářiče do organismu, protože může vážně poškodit buňky.



Obr. 2-1 Emise alfa částice z jádra atomu [25]

2.2.2 Záření beta (záření β)

Záření β je tvořeno rychle létajícími záporně nabitými elektrony (β^-) nebo kladně nabitými pozitrony (β^+). Při rozpadu β^- se neutron mění na proton a elektron. Rozpad β^+ se vyskytuje jen u umělých nuklidů, kdy se proton mění na neutron a pozitron. Záření β má spojité energetické spektrum. Beta částice (viz obr. 2-2) jsou v porovnání s alfa částicemi mnohem lehčí, a proto se pohybují rychleji. Při průchodu prostředím méně ionizují a excitují. Z tohoto důvodu částice β neztrácejí tak rychle svoji energii a mají delší dolet.

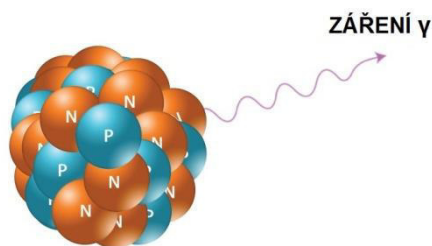


Obr. 2-2 Emise beta částice z jádra atomu [25]

2.2.3 Záření gama (záření γ)

Záření γ (viz obr. 2-3) je elektromagnetické záření, s vlnovou délkou kolem 10^{-13} m. Jeho energetické spektrum je čárové. Má vysokou energii, protože energie záření je nepřímo úměrná vlnové délce, která je velmi malá. Toto záření způsobuje ionizaci prostředí nepřímo a to tak, že částice gama při průchodu prostředím vyražejí z atomů elektrony a dodají jim

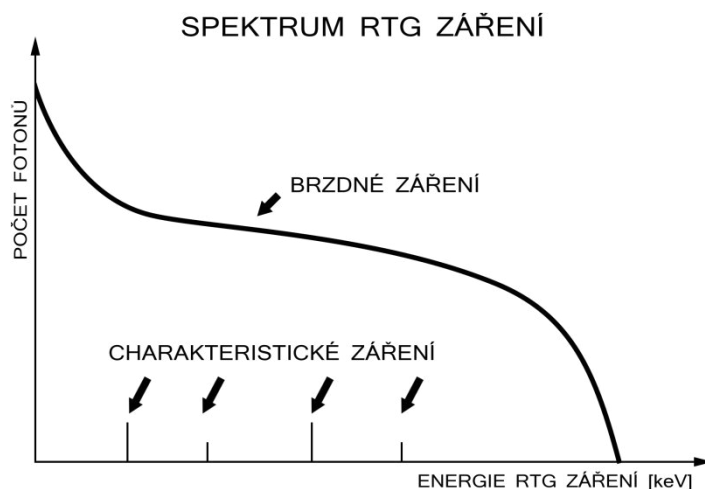
takovou energii, že jsou poté schopny ionizovat a excitovat okolní prostředí. Záření γ má v porovnání s α a β zářením největší pronikavost. [5] [8] [9] [24]



Obr. 2-3 Emise z vysokoenergetické vlny z jádra atomu [25]

2.2.4 Rentgenovo záření (RTG záření)

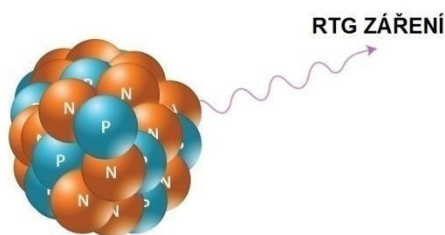
RTG záření je elektromagnetické záření, jehož vlnová délka se pohybuje v intervalu 10^{-9} - 10^{-13} m. Jeho spektrum vykreslené na obr. 2-4 je tvořeno charakteristickým a brzdovým zářením.



Obr. 2-4 Spektrum RTG záření

RTG záření (viz obr. 2-5) vzniká v rentgence. Dopadající elektrony na anodu rentgenky s vysokou kinetickou energií excitují nebo ionizují elektrony v atomovém obalu wolframu. Vybuzené elektrony se vrací zpět a zbavují se přebytku energie vyzářením fotonů elektromagnetického záření. Toto záření se nazývá **charakteristické** a jeho spektrum je čárové. Energie charakteristického záření je závislá na materiálu anody. **Brzdné záření** vzniká zabrzděním rychlých elektronů v poli atomového jádra wolframu. Každý foton má jinou energii, tudíž energetické spektrum brzdného záření je spojité. Elektrony, které způsobí vznik brzdného záření, předávají různou část energie teplu a jinou záření. Nelze o určitém

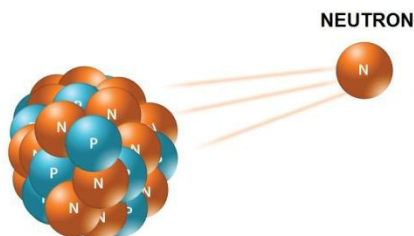
elektronu říct, v jakém poměru se přemění na teplo a záření. Fotony brzdného záření s malou energií, jsou filtrovány procházejícím prostředím. [5] [29]



Obr. 2-5 Emise vysoké energetické vlny z elektronového obalu atomu [25]

2.2.5 Záření neutronové

Neutronové záření (viz obr. 2-6) je tvořeno rychle letícími neutrony uvolňující se z jader při jaderných reakcích. Neutrony mají vysokou pronikavost a ionizují nepřímo, protože mají nulový elektrický náboj. Pokud se neutron nachází mimo jádro atomu, není stabilní. [3] [9] [25]



Obr. 2-6 Emise neutronu z jádra atomu [25]

2.3 Jednotky ionizujícího záření

2.3.1 Ionizace plynu

Expozice X v daném bodě je podíl absolutní hodnoty celkového elektrického náboje dQ iontů jednoho znaménka, vzniklých ve vzduchu o hmotnosti dm při úplném zabrzdění všech elektronů a pozitronů, které byly uvolněny fotony. Jednotkou je coulomb na kilogram ($C \cdot kg^{-1}$). Dříve byla používána jednotka rentgen ($1R = 2,580 \cdot 10^{-4} C \cdot kg^{-1}$).

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad [C \cdot kg^{-1}]. \quad (2.1)$$

Expoziční příkon $\dot{X}$ je podíl přírůstku expozice dX za časový interval dt .

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt} \quad [C \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}; A \cdot kg^{-1}]. \quad (2.2)$$

2.3.2 Absorpce energie v látce

Dávka D je v daném bodě určený podíl střední sdělené energie dE , předané ionizujícím zářením látce o hmotnosti dm . Dávka platí pro jakýkoliv látkový objekt. Jednotkou dávky je gray (Gy).

$$D = \frac{dE}{dm} \quad [Gy; J \cdot kg^{-1}]. \quad (2.3)$$

Dávkový příkon $\dot{D}$ je podíl přírůstku dávky dD za časový interval dt .

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad [Gy \cdot s^{-1}; W \cdot kg^{-1}]. \quad (2.4)$$

2.3.3 Absorpce energie ve tkáni

Dávkový ekvivalent H je součin absorbované dávky D v uvažovaném bodě tkáně a jakostního činitele Q v tomto bodě. Jakostní činitel je bezrozměrný modifikující činitel, který vyjadřuje rozdílnou biologickou účinnost různých druhů záření. Protože hodnota jakostního činitele závisí na druhu a energii záření, tak dávkový ekvivalent je roven absorbované dávce, která při jakémkoliv typu záření vyvolá v organické látce stejný biologický účinek. Jednotkou dávkového ekvivalentu je sievert (Sv).

$$H = D \cdot Q \quad [Sv; J \cdot kg^{-1}]. \quad (2.5)$$

Příkon dávkového ekvivalentu $\dot{H}$ je podíl přírůstku dávkového ekvivalentu dH za časový interval dt .

$$\dot{H} = \frac{dH}{dt} \quad [Sv \cdot s^{-1}; W \cdot kg^{-1}]. \quad (2.6)$$

Efektivní dávka H_E je součet vážených středních hodnot dávkových ekvivalentů H_T v daných tkáních a orgánech lidského těla,

$$H_E = \sum_T w_T \cdot H_T \quad [Sv; J \cdot kg^{-1}], \quad (2.7)$$

kde w_T je váhový činitel. Je to bezrozměrná veličina, která bere v úvahu citlivost orgánů na ozáření. Proto efektivní dávka oproti ekvivalentní dávce zohledňuje kromě druhu záření také, jak citlivé na ozáření jsou orgány, které byly ozářeny. [6] [21] [27] [31]

2.4 Biologické účinky ionizujícího záření

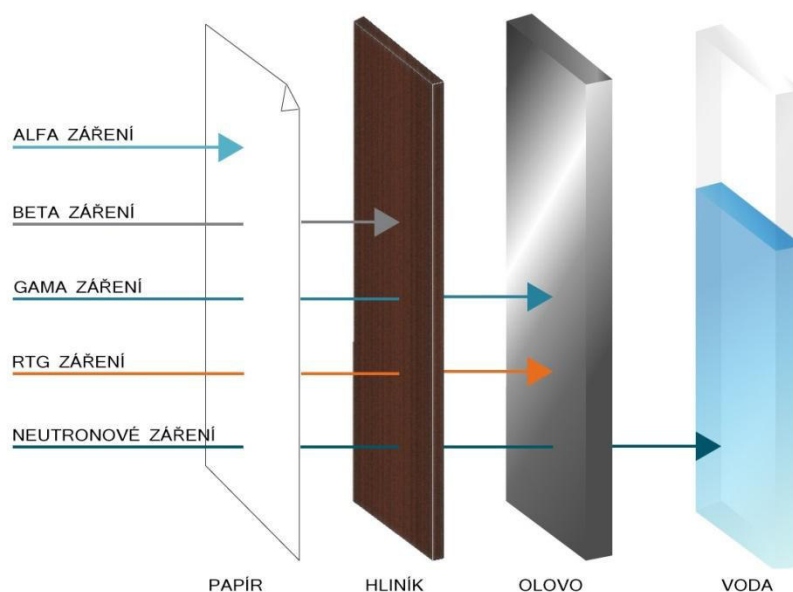
Energie od ionizujícího záření se přenáší na atomy prostředí, dochází tím k primárnímu poškození biologických struktur. Molekuly ztrácejí své specifické vlastnosti díky radiačně-chemickým změnám. Vyskytují se odchylky v biochemických pochodech, mění se aktivita enzymů, je narušena syntéza nukleových kyselin a bílkovin, apod. Ztráta důležitých buněk vede k narušení funkce životně důležitých orgánů. Ionizující záření vyvolává změny genetické informace (mutace) a tím způsobuje poškození i smrt buňky.

Biologické systémy obsahují velké množství vody, a tudíž se značná část záření absorbuje ve vodě. Ve vodě po ozáření vzniká radiolýza, při níž vznikají vysoce reaktivní produkty, tj. volné radikály (hydroxylový radikál $OH\cdot$, vodíkový radikál $H\cdot$). Vzniká také peroxid vodíku (H_2O_2). Tyto produkty vyvolávají sekundární reakce s biologickými molekulami, přičemž mohou poškozovat molekuly DNA.

Konečný účinek ionizujícího záření závisí na dávce a dávkovém příkonu, na použitém druhu záření a na metabolickém stavu organismu v době ozáření. [9] [28]

2.5 Ochrana před ionizujícím zářením

Každá ionizující částice vytváří kolem své dráhy mnoho iontů, elektronů i excitovaných stavů. Tím částice postupně ztrácí schopnost dále ionizovat a excitovat, protože odevzdává energii absorbující látce. Nakonec dojde k úplné absorpci částice. Pronikavost (míra absorpce) jednotlivých druhů ionizujícího záření (viz obr. 2-7) závisí na druhu a vrstvě látky, kterou ionizující záření prochází. [2]



Obr. 2-7 Pronikavost jednotlivých druhů ionizujícího záření [25]

Při výběru ochranné pomůcky proti ionizujícímu záření je nutno vědět, jaký druh záření nás může ohrozit. Záření α odstíníme pouhou několika centimetrovou vrstvou vzduchu nebo papírem, Záření β se dobře stíní tenkými deskami dřeva a hliníku. RTG záření a záření γ jde odstínit například olovem, železem, betonem a wolframem. Neutronové záření je možné odstínit vodou, protože se nejlépe odstíní materiálem s vysokým obsahem vodíkových atomů. Vždy ale záleží na **vrstvě materiálu**, která se hodnotí podle takzvané polovrstvy. Polovrstva je taková tloušťka materiálu, která zeslabí dopadající záření na polovinu.

Dále se můžeme chránit **vzdáleností** od zdroje záření, protože se záření snižuje se čtvercem vzdálenosti od zdroje. To znamená, že se ozáření sníží čtyřikrát při dvojnásobné vzdálenosti od zdroje.

Protože je dávka vždy úměrná **době** ozáření, tak je důležité, abychom se pokud možno v oblasti ionizujícího záření vůbec nezdržovali nebo jen takovou dobu, která je nezbytně nutná. Vždy je nutno se snažit o co nejkratší dobu vystavení svého těla ionizujícímu záření.

Velmi důležitou veličinou při ochraně před ionizujícím zářením je ekvivalentní nebo efektivní dávka absorbovaná organismem. Existuje minimální dávka ozáření, které se vyhnout nelze. Je způsobena přirozenými zdroji záření, tj. záření pocházející z vesmíru, hornin, půdy, vody, vzduchu, rostlin i z potravin. Přírodní pozadí se na různých místech Země velmi liší. Důvodem je především rozdílná radioaktivita hornin. Průměrný dávkový příkon z přírodního pozadí v České republice je 2,5 až 3 mSv/rok. Záření, před kterým je možné se chránit, pochází například z lékařských zařízení. Je nutné při činnostech s ionizujícím zářením udržovat absorbovanou dávku jednotlivce na co nejnížší možné úrovni.

Celková radiační dávka za určité období nesmí přesáhnout stanovené limity, které jsou popsány ve vyhlášce 307/2002 Sb.

Limity pro radiační pracovníky jsou:

- 50 mSv za kalendářní rok pro efektivní dávku,
- 100 mSv za 5 za sebou jdoucích kalendářních roků pro efektivní dávku,
- 150 mSv za kalendářní rok pro ekvivalentní dávku v oční čočce,
- 500 mSv za kalendářní rok pro průměrnou ekvivalentní dávku v 1 cm^2 kůže,
- 500 mSv za kalendářní rok na ruce od prstů až po předloktí a na nohy od chodidel až po kotníky pro ekvivalentní dávku.

Limity pro učně a studenty jsou:

- 6 mSv za kalendářní rok pro efektivní dávku,
- 50 mSv za kalendářní rok pro ekvivalentní dávku v oční čočce,
- 150 mSv za kalendářní rok pro průměrnou ekvivalentní dávku v 1 cm^2 kůže,
- 150 mSv za kalendářní rok na ruce od prstů až po předloktí a na nohy od chodidel až po kotníky pro ekvivalentní dávku.

Obecné limity pro obyvatelstvo jsou:

- 1 mSv za kalendářní rok pro efektivní dávku,
- 5 mSv za 5 za sebou jdoucích kalendářních roků pro efektivní dávku,
- 15 mSv za kalendářní rok pro ekvivalentní dávku v oční čočce,
- 50 mSv za kalendářní rok pro průměrnou ekvivalentní dávku v 1 cm^2 kůže. [1] [4] [26] [30]

3 Detektory ionizujícího záření

Detektor ionizujícího záření je zařízení nebo látka, v níž se energie ionizačního záření přemění na jiný druh energie, který je snadno měřitelný. Při volbě detektoru pro detekci či měření je důležité zvážit, jaký druh a energie záření jsou použity. Každý detektor je schopen měřit různé druhy záření, ale aby byl detektor schopen reagovat, musí být patřičně upraven.

3.1 Rozdělení přístrojů pro měření ionizujícího záření

Přístroje lze rozdělit podle druhu měření na dozimetry, které měří stupeň ozáření, tj. dávku. Radiometry, které se využívají k měření četnosti vzniklých impulzů souvisejících s intenzitou záření. Spektrometry zobrazující energetické spektrum záření. Radionuklidové přístroje slouží pro stopovací diagnostiku, kdy se radionuklid s pevně vázaným nosičem zavede do těla pacienta. Radionuklid je následně vychytáván v požadovaném orgánu a snímán například gama kamerou.

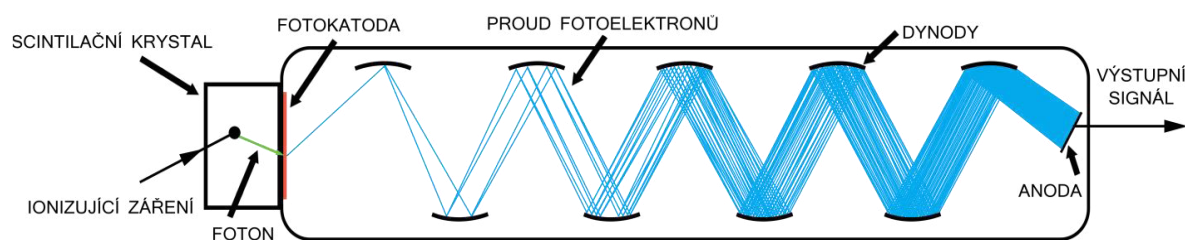
Dále lze přístroje rozdělit podle časového průběhu detekce na integrální a kontinuální průběh. Přístroje, které mají kontinuální průběh detekce, měří okamžitou hodnotu intenzity ionizujícího záření. Přístroje s integrálním průběhem měří celkovou energii, předanou detektoru, ionizujícího záření při opakovaném ozáření. Přijatá energie ionizujícího záření detektorem se přičítá k uchované energii z předešlých ozáření (kumuluje se).

Přístroje lze také rozdělit podle principu činnosti na plynem plněné detektory a detektory pevné fáze. Plynem plněné detektory využívají pro svoji detekci ionizace v plynové náplni. Principem detekce detektorů pevné fáze je změna jejich fyzikálních vlastností při dopadu ionizujícího záření (např. záblesk ve scintilačním krystalu). [3] [4] [5] [11]

4 Detektory pevné fáze

4.1 Scintilační detektor

Hlavní součástí scintilační sondy (viz obr. 4-1) je scintilátor a fotonásobič. Když dopadne ionizující záření na scintilátor, vybudí tak elektrony do zakázaného energetického pásma. Elektrony se však vrací okamžitě zpět a přitom se vyzáří kvantum fotonového záření, které je tím intenzivnější, čím je větší energie dopadajícího ionizujícího záření. Světelný záblesk prochází tenkou vrstvou silikonové vazelíny přes okénko do fotonásobiče a dopadá na fotokatodu, která má nulový potenciál. Díky fotoelektrickému jevu dopadající fotony vyrážejí z fotokatody několik elektronů, které dále putují přes sérii dynod, kde se tento slabý tok elektronů postupně zesiluje. Mezi dynodami je vytvořeno zesilující se elektrické pole, protože je na dynody přiloženo vzrůstající kladné napětí. Elektrony jsou tedy násobeny a urychlovány každým dopadem na dynodu s vyšším potenciálem. Zesílený tok elektronů (elektrický signál) z poslední dynody dopadá na anodu, která má nejvyšší kladný potenciál. Přes zatěžovací odpor je měřitelný elektrický impuls, jehož velikost je úměrná energii, kterou částice odevzdaly detektoru. [2] [3] [4]



Obr. 4-1 Scintilační sonda

4.2 Polovodičový detektor

Polovodičové detektory využívají vhodných polovodičových materiálů (germania a křemíku). Citlivou oblastí detektoru je PN přechod. K tomu je z vnějšku přes odpor připojen zdroj napětí tak, že tento PN přechod je polován v nepropustném směru. Vnikne-li ionizační záření do polovodičového detektoru, elektrony získají takovou energii, že přeskočí do vodivostního pásma a tím vznikají páry elektron – díra, což jsou základní nosiče informace o energii záření. Detekční signál (elektrický proud procházející přes tento přechod) je tvořen vychytáváním těchto párů, díky elektrickému poli, které se na PN přechodu pomocí vnějšího zdroje vytvoří. Velikost elektrického proudu je úměrná energii dopadajícího záření. Polovodičové detektory s příslušnou elektronikou dokážou měřit expozici, dávku, dávkovou rychlost a energii záření.

Výhodou je nízká potřebná energie k vytvoření párů elektron-díra ve srovnání s iontovými páry v plynu, kterých se využívá v plynných plněných detektorech. Z tohoto

důvodu mají polovodičové detektory i lepší energetikou rozlišovací schopnost. Mají malé rozměry a jsou mechanicky odolné. Velkou výhodou je, že se současné křemíkové detektory nemusí chladit a pracují při pokojové teplotě. První polovodičové detektory, které se vyráběly, byly z germania. U těchto detektorů je nutné chlazení kapalným dusíkem, protože při pokojové teplotě vznikají páry elektron-díra samovolně i bez ionizačního záření. [3] [5] [6] [11] [19]

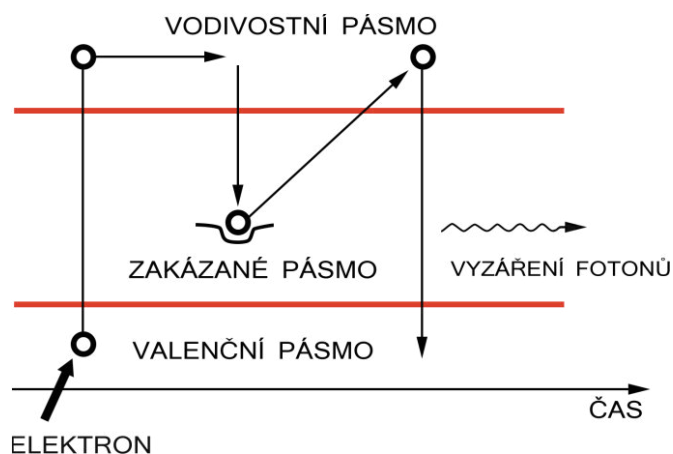
4.3 Filmové dozimetry

Filmové dozimetry tvoří uzavřené pouzdro, v němž je řada filtrů (určují pro jaké záření je detektor citlivý), prázdné okénko a film, který je citlivý na ionizační záření. Film je zalaminován do černého papíru, který je odolný proti vniknutí světla. V emulzi filmu jsou rozptýlena zrnka bromidu stříbrného. Při ozáření filmu ionizujícím zářením se vytváří jeho latentní zčernání. Při vyhodnocení se film vyvolá podle přesného předepsaného způsobu, bromid se rozpustí, stříbro v emulzi zůstává. Film zčerná, přičemž míra zčernání odpovídá absorbované dávce záření. Množství dopadajícího záření na film je úměrné právě množství nerozpuštěného stříbra, které je měřeno denzitometrem (aby se vyloučil lidský faktor). Filtry v různé míře oslabují dopadající záření o dané energii a pomocí výpočtů umožňují stanovit druh a energii dopadajícího záření.

Filmový dozimetr je vhodný pro měření β , γ a rentgenového záření. Informuje o dávce, druhu a energii záření, případně zda se jedná o jednorázové nebo opakované měření. Nevýhodou je značně komplikovaný časově náročný vyvolávací proces, proto jsou filmové dozimetry v současné době nahrazovány tepelnou a opticky stimulovou luminiscencí. [3] [5] [11] [18] [20]

4.4 Termoluminiscenční detektory (TL detektory)

Termoluminiscenční detektory využívají jevu luminiscence. Tento jev je znázorněn na obr. 4-1. Ionizující záření dopadající na termoluminiscenční materiál vybudí elektrony do vodivostního pásma. Elektrony se však nevracejí okamžitě zpět do pásma valenčního, ale jsou zachyceny v zakázaném energetickém pásmu v záchytných centrech na nečistotách, které tam jsou úmyslně vpraveny. Elektrony se vracejí do valenčního pásma až tehdy, když je materiál stimulován teplem. Ztráta energie elektronů je doprovázena vyzářením fotonů v oblasti viditelné vlnové délky.



Obr. 4-2 Luminiscence

TL detektory využívají vhodných materiálů, TL luminoforů, na kterých se shromažďuje absorbovaná energie s přibývajícím dávkou ozáření. Při zahřátí TL detektoru na požadovanou teplotu, dojde k vyzáření získané energie z celého detektoru v podobě fotonů viditelného světla. Světelný tok je měřen fotonásobičem. Absorbovaná energie ionizujícího záření v TL detektoru je úměrná velikosti vyzářeného viditelného světla (celkovému ozáření). TL detektory se používají v osobní dozimetrii.

Pro hodnocení osobních dozimetrů se v této době více využívá metoda **opticky stimulované luminiscence (OSL)**, kdy je materiál stimulován laserem s vhodnou vlnovou délkou. Laserem je možné bodově pod jednotlivými filtry vyhodnocovat části detektoru a využít tak filtrační analýzy, ke zjištění o druhu a energii záření. Pro měření celkové dávky ozáření se využívá buď vyhodnocení tepelné, nebo plošné ozáření laserem. Na obr. 4-2 je vpravo ukázka prstového dozimetru TL a vlevo je vidět celotělový osobní dozimetr OSL. [3] [4] [5] [7] [11] [17] [31]



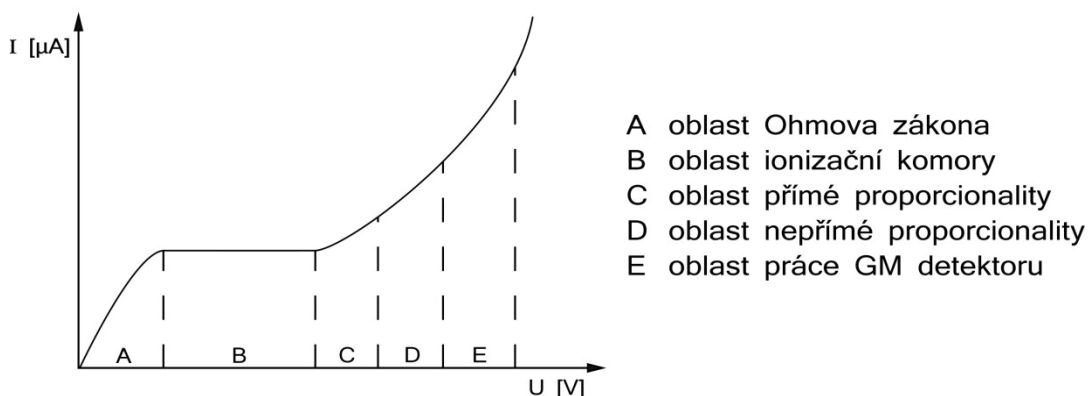
Obr. 4-3 Celotělový osobní dozimetr OSL a prstový dozimetr TL [32] [33]

5 Plynem plněné detektory

Plynem plněné detektory využívají ionizace plynové náplně. Patří mezi ně ionizační komora, proporcionální detektor a Geiger-Müllerův detektor (GM detektor).

Pro pochopení činnosti plynem plněných detektorů je vhodné uvést voltampérovou charakteristiku, která je uvedena na následujícím obr. 5-1, znázorňující závislost ionizačního proudu na napětí v komoře. Napětí je přiloženo na elektrody detektoru a ionizační proud je tvořen proudem iontů uvnitř plynu vyvolaných ionizujícím zářením.

VOLTAMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA

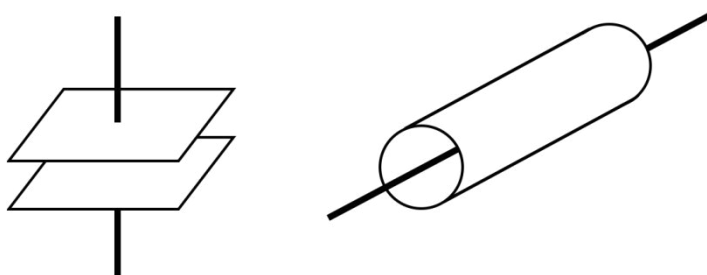


Obr. 5-1 Voltampérová charakteristika

V **oblasti Ohmova zákona** je napětí tak malé, že dovolí rekombinaci. Nevychytají se tedy všechny vytvořené volné ionty, protože některé rekombinují zpět na neutrální atomy a tudíž se nepodílí na ionizačním proudu. V **pracovní oblasti ionizační komory** je napětí takové velikosti, aby nedocházelo k rekombinaci. Je vytvořeno takové elektrické pole, ve kterém jsou všechny vzniklé ionty vychytávány. Pracovní napětí se nastavuje do středu této oblasti. Velikost napětí je závislá na vzdálenosti elektrod a na počtu přímo ionizujících částic. Elektrody od sebe méně vzdálené vyžadují menší velikost napětí než elektrody, které jsou od sebe vzdálené více. Čím větší počet přímo ionizujících částic je měřen, tím menší musí být vzdálenost mezi elektrodami nebo se přikládá vyšší napětí na komoru. Hodnota proudu je závislá na druhu a počtu detekovaných částic a objemu komory. **Oblast přímé proporcionality** je charakteristická dalším zvyšováním napětí, kinetická energie kladných iontů a elektronů se zvyšuje a dochází k sekundární ionizaci mechanickými nárazy volných iontů na neutrální atomy a molekuly plynu. Přídavná nárazová ionizace je přímo úměrná počtu iontů a využívají toho proporcionální detektory. Při dalším zvyšování napětí iontů stále přibývá, ionizační proud tedy neodpovídá intenzitě dopadajícího záření. Tato oblast je označena jako **oblast nepřímé proporcionality**. **Oblast práce GM detektorů** je poslední částí voltampérové charakteristiky. Je to oblast, kde dochází po průchodu záření ke krátkodobému lavinovitému výboji.

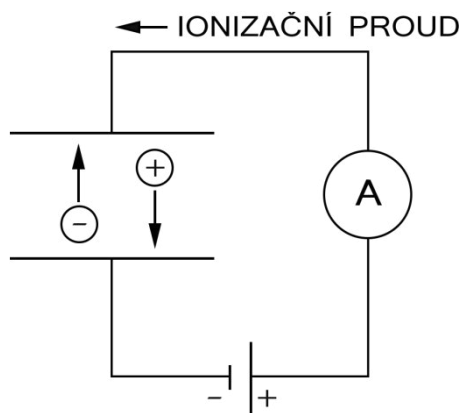
5.1 Ionizační komora

Ionizační komora je nejjednodušší a nejpoužívanější z detektorů ionizujícího záření, která může být paralelního nebo válcového tvaru (viz obr. 5-2). Paralelní ionizační komora je složena ze dvou paralelně uspořádaných elektrod. Válcová ionizační komora má koaxiální uspořádání elektrod. Komory se nejčastěji provádějí jako otevřené, v komoře je vzduch s parametry vnější atmosféry. Elektrody jsou připojeny na stejnosměrné napětí takové velikosti, které zesílí elektrické pole natolik, aby se na elektrody vychytaly všechny vzniklé ionty. Ionizační komora je připojena na napětí, jehož velikost je volena do středu pracovní oblasti ionizační komory vyznačené na obr. 5-1. Bez přítomnosti ionizujícího záření obvodem neprochází žádný proud.



Obr. 5-2 Tvary ionizačních komor

U tohoto detektoru se využívá ionizace vzduchu po vstupu ionizující částice do detektoru. Přímooionizující částice okamžitě vzduch ionizují, vzniká tak mnoho kladných iontů a elektronů. Nepřímooionizující záření nejprve interaguje se stěnou komory, přičemž se vytváří přímooionizující částice, které vyvolávají ionizaci vzduchu. Obvodem začíná protékat ionizační proud, protože vzniklé kladné ionty jsou elektrickým polem přitahovány na elektrodu zápornou a elektrony na opačně polarizovanou elektrodu. Tento princip je znázorněn na obr. 5-3. Ionizační proud je přímo úměrný intenzitě ionizujícího záření. [2] [3] [4] [11] [31]

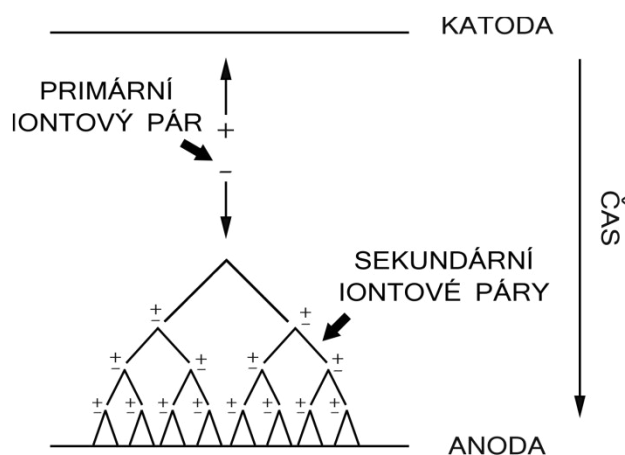


Obr. 5-3 Princip ionizační komory

5.2 Proporcionální detektory

Proporcionální detektory jsou obvykle tvořeny válcovou katodou s centrálním vodičem, který tvoří anodu. Mezi anodu a katodu je přiloženo stejnosměrné napětí v oblasti přímé proporcionality, která je vyznačena na obr. 5-1. Detektor je vyplněn plynovou náplní. Nejčastěji se využívá vzácných plynů. Nejpoužívanější bývá plyn označován jako P 10, jehož složení je 90 % argonu a 10 % metanu. Mezi další používané plyny patří krypton a xenon.

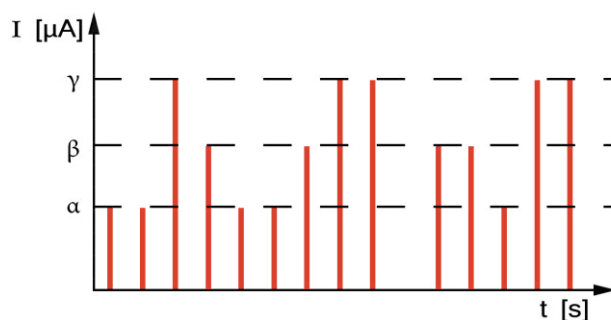
V případě, kdy je plyn detektoru ionizován, vytvoří se iontové páry. Kladné ionty jsou přitahovány ke katodě. Elektrony se pohybují směrem k anodě. V blízkosti anody je velmi silné elektrostatické pole, elektrony nabírají na rychlosti a jsou schopny vyvolat sekundární ionizaci za vzniku dalších iontových párů. Vzniká velmi mnoho elektronů, které se pohybují ještě v silnějším elektrickém poli. Každý iontový pár vytvoří lavinu ionizace, která je znázorněna na obr. 5-4.



Obr. 5-4 Lavina ionizace

Všechny laviny dohromady přispívají ke vzniku měřitelného elektrického impulzu, jehož velikost je závislá na velikosti energie ionizačního záření a na hodnotě přiloženého napětí k detektoru. Na obr. 5-5 je vidět porovnání velikosti amplitud impulzů vytvořených α , β a γ zářeními v plynu proporcionálního detektoru.

POROVNÁNÍ VÝŠKY PROUDOVÝCH IMPULZŮ

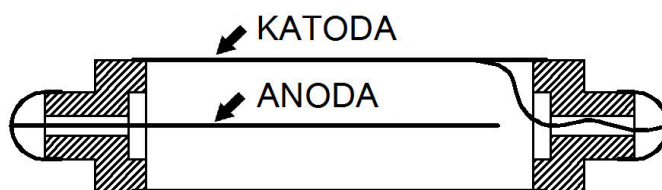


Obr. 5-5 Porovnání velikosti proudových impulzů [14]

Proporcionální detektor měří impuls s amplitudou úměrnou energii záření, proto je vhodný pro rozpoznávání druhu ionizačního záření. V měření spekter ale není tak citlivý ve srovnání například se scintilačním detektorem. [12] [13]

5.3 Geiger-Müllerovy detektory (GM detektory)

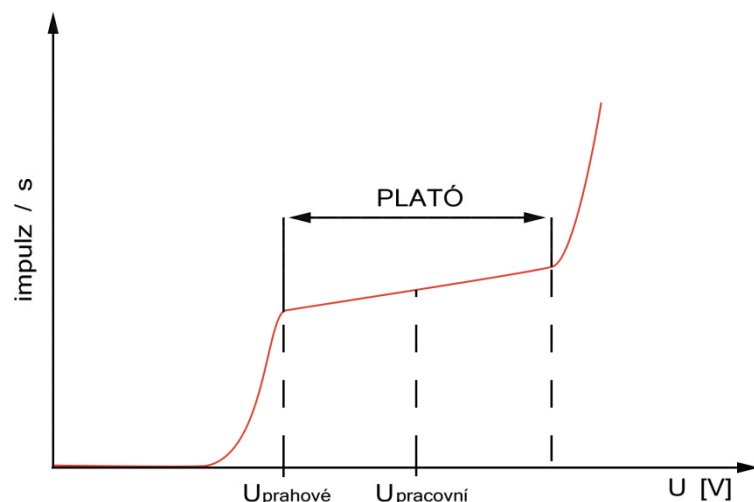
GM detektor tvoří trubice, která je vždy uzavřená. GM trubice je zobrazena na následujícím obrázku (viz obr. 5-6). Obsahuje vnější válcovou katodu, která je připojena na záporné stejnosměrné napětí. Materiál katody je kov, nebo sklo s napařenou vodivou vrstvou. Anodu tvoří drát umístěný ve středu trubice, který je připojen přes odpor na kladné stejnosměrné napětí. Pro detekci α záření musí mít GM trubice okénko s velmi prostupného materiálu, jinak by záření přes trubici neprošlo a nebylo by zaznamenáno. Detektor je obvykle vyplněn heliem nebo argonem s přídavkem zhasécího plynu.



Obr. 5-6 GM trubice [11]

Prahové napětí je hodnota, u kterého GM trubice začíná reagovat impulsem na ionizační částice, je voleno v oblasti práce GM detektorů (tato oblast je znázorněna ve voltampérové charakteristice na obr. 5-1). Na obr. 5-7 je zobrazena impulzová charakteristika GM detektoru.

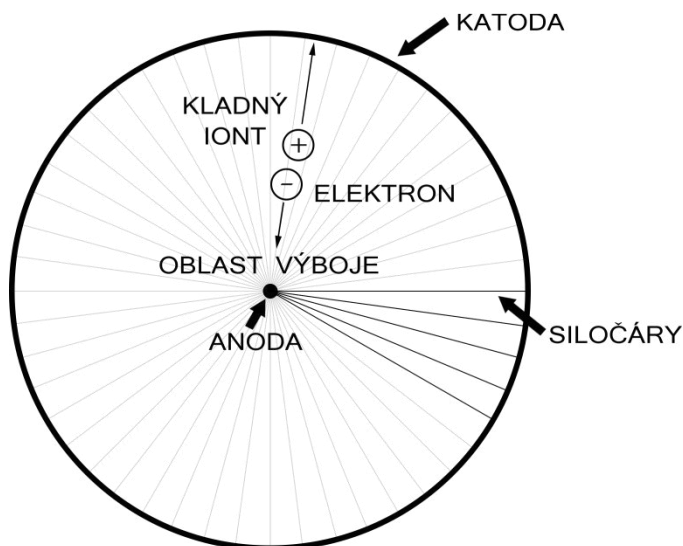
PRACOVNÍ CHARAKTERISTIKA GM TRUBICE



Obr. 5-7 Pracovní charakteristika GM trubice

Tato charakteristika ukazuje závislost počtu impulzů za sekundu na přiloženém napětí. Prahové napětí určuje počátek vytváření výbojů. V oblasti nižšího napětí než je prahové, pracuje GM trubice jako ionizační komora (měří se proud). Oblast plata znázorňuje rozsah napětí, při kterém je počet registrovaných částic téměř konstantní. Je mírně stoupající, jeho sklon se vyjadřuje v procentech. Nejlepší detektory s GM trubicí mají sklon plata menší než 0,03 %. Pracovní napětí GM detektoru se volí do středu plata.

Při vniku ionizačního záření do GM trubice je její plyn ionizován a vzniká nejméně jeden iontový pár. Těžké kladné ionty jsou pomalu přitahovány ke katodě, v jejíž oblasti je elektrické pole slabé. Elektrony se pohybují směrem k anodě, která má díky větší koncentraci siločar kolem sebe pole výrazně zesílené. Díky narůstajícímu gradientu pole jsou v blízkosti anody elektrony výrazně urychlovány. Jejich kinetická energie je tak velká, že ionizují další atomy plynu. Vzniknou tak ve velmi silném elektrickém poli další kladné ionty a elektrony, které také vytvářejí ionizaci. Tím vzniká tak obrovská hustota ionizace, že se v GM trubicí vytvoří lavinovitý výboj (GM trubice zapálí). Na obr. 5-8 je nakreslen řez GM trubicí.



Obr. 5-8 Řez GM trubici

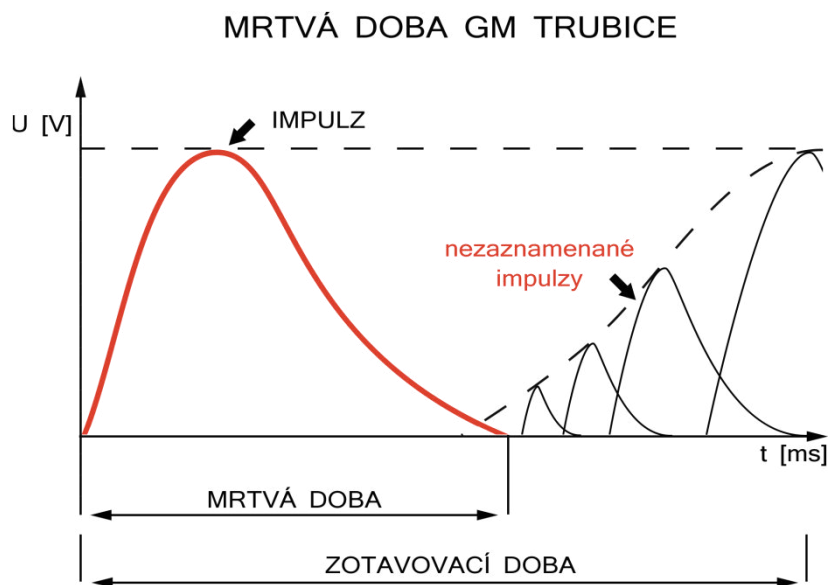
Pro správnou funkci detektoru je nutné rychle zhaset vzniklý výboj, aby se předešlo vzniku falešných impulzů a mohl tak detektor zaznamenat další ionizující částici. GM trubice se podle způsobu zhasení výboje rozdělují na samozhášecí a nesamozhášecí. Nesamozhášecí trubice mají připojen vnější zhasecí obvod. V současné době se však používají trubice samozhášecí, které mají v plynové náplni přídavek zhasecích plynů. Nejčastěji se využívá alkoholových par, ethylesteru kyseliny mravenčí nebo vhodných halogenů.

Důvodem vzniku falešných impulzů je dolétávání kladných iontů plynové náplně na katodu. I když se pohybují ve slabém elektrickém poli, získávají vysokou kinetickou energii a mohou vyrazit z katody další elektron, který následně vytvoří impulz i bez přítomnosti ionizujícího záření. Však díky dostatečné koncentraci zhasecích plynů jsou vzniklé kladné ionty plynové náplně neutralizovány a ke katodě se dostávají pouze kladné ionty zhasecího plynu a tím nevznikají falešné impulzy.

Trubice s alkoholovými parami nebo s ethylesterem kyseliny mravenčí mají omezenou životnost na cca 10^8 - 10^{10} impulzů. Omezená životnost je dána tím, že nedochází k regeneraci disociovaných molekul organických zhasecích příměsí na původní nedisociované molekuly. S každým impulzem se tak snižuje počet neutrálních molekul zhasecího plynu. S rostoucím počtem registrovaných ionizujících částic zhasecí plyn ubývá a GM trubice ztrácí schopnost zabránit nežádoucím falešným impulzům. Životnost GM trubic souvisí s nárůstem sklonu plata v impulzní charakteristice.

Trubice s halogenovými zhasecími plyny životnost omezenou nemají. Halogeny disociují zpět na neutrální molekulu, a proto počet impulzů není omezen. Zde je však jednak problém s výrobou takových GM detektorů a také se liší jejich elektrické vlastnosti.

GM trubice po výboji nemůže určitou dobu registrovat žádnou ionizující částici. Důvodem je vznik kladného prostorového náboje kolem anody, díky těžkým iontům putujících velmi pomalu ke katodě, který brání vzniku dalšího pracovního cyklu detekce. Tento časový úsek je označován, jako **mrtvá doba** GM trubice (viz obr. 5-9). Postupným slábnutím vlivu kladných iontů na pole uvnitř detektoru se obnovuje situace, při které může vzniknout lavinovitý výboj, vyvolaný další přicházející částicí ionizujícího záření. Vzniklé výboje mají menší proudovou hodnotu, která ale postupně narůstá. Po uplynutí zotavovací doby je již výstupní napěťový signál detekovatelný (dosáhl detekční úrovně).



Obr. 5-9 Mrtvá doba GM trubice

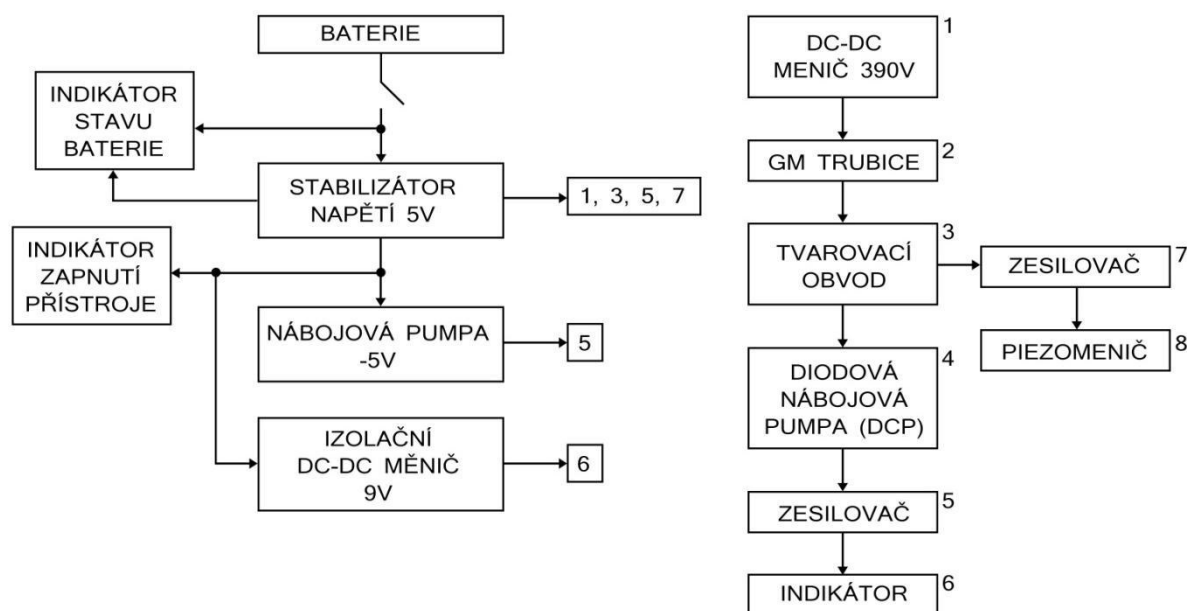
GM trubice reaguje impulzem na jednotlivé částice. Pokud vnikne ionizující částice dovnitř GM trubice, začne ji procházet (díky lavinovité ionizaci) po určitou dobu proud. U samozhášecích trubic tento čas určuje příslušný zhášecí plyn a nesamozhášecích trubic příslušná elektronika. Pro další zpracování signálu je potřebný napěťový impuls. Proto je do série s GM trubicí zařazen odpor, na kterém tento napěťový impuls vzniká. Protože velikost impulsu vzniklého v GM trubici neodpovídá dopadající energii (výstupní napěťový impuls má téměř stejnou amplitudu), nemůže být použit k určení přesné energie detekovaného záření. Z tohoto důvodu nedokáže rozlišit různé druhy a energie záření.

GM detektor dosahuje 100% účinnosti pro záření α a β^- , ale pouze tehdy, kdy částice vnikají do detektoru v intervalech delších, než je mrtvá doba. Pokud je frekvence dopadajících částic vyšší než mrtvá doba, tak některé částice nebudou zaznamenány a tím se bude snižovat účinnost. Nevýhodou je jeho nízká účinnost pro fotony, pohybuje se kolem 2%. Nízká účinnost souvisí jak se zmiňovanou mrtvou dobou, tak i s tím, že ne každý foton (vyvolá nepřímou ionizaci) vyrazí elektron z katody, který následně způsobí ionizaci plynu.

Detektor s GM trubicí slouží především k detekci α , β a γ záření. Záleží však na citlivosti trubice k různým druhům a energiím ionizujícího záření, která se liší silou stěny trubice. GM detektor měří četnosti impulzů nebo pomocí příslušné elektroniky měří integrálně střední hodnotu četnosti. [10] [11] [15] [22] [31]

6 Návrh blokového schématu detektoru záření s využitím GM trubice

6.1 Blokové schéma



Obr. 6-1 Blokové schéma

6.2 Popis jednotlivých bloků

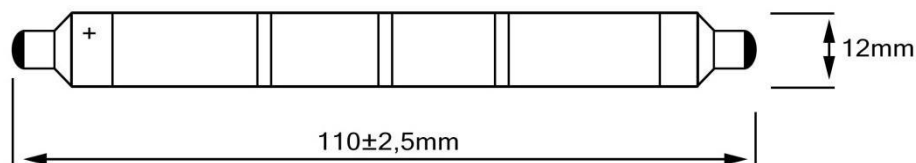
GM trubice STS-5



Obr. 6-2 GM trubice STS-5 [34]

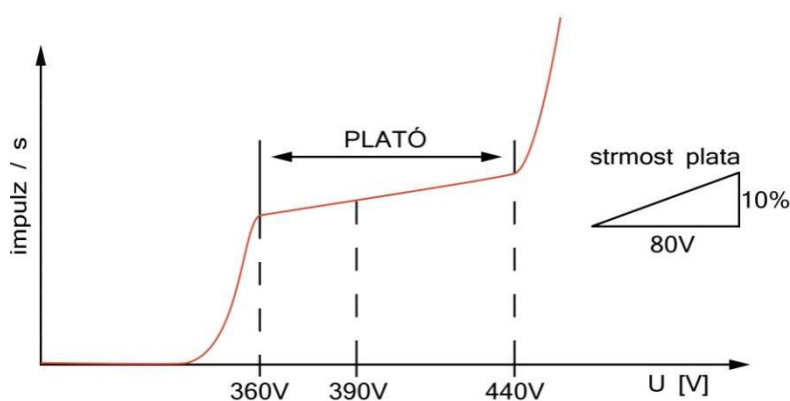
Technické parametry jsou:

- Rozměry (viz obr. 6-3),
- napětí počátku počítání: 280-330V,
- doporučené pracovní napětí: 360-440V,
- nejmenší délka plata: 80V,
- největší sklon plata: 0,125% na 1V,
- největší úroveň pozadí: 27 impulsů za minutu,
- detekované záření: β a γ .



Obr. 6-3 Rozměry GM trubice STS-5

Pracovní charakteristika:



Obr. 6-4 Pracovní charakteristika GM trubice STS-5

Podmínky použití:

- Odpor zátěže: 5-10M Ω ,
- největší přípustná parazitní kapacita vstupu elektroniky: 10nF,
- přípustné kolísání okolní teploty: -40 až +50°C.

Podmínky prodloužení životnosti:

- Zabránit pádu předmětu na trubici,
- ochránit trubici před úderem a mechanickým namáháním,
- při zapojení trubice dbát na polaritu přiloženého napětí. [34]

Baterie

Zde předpokládám předběžně NiMh akumulátor s napětím 5V složený z 5 článků. Jeho napětí v nabitém stavu (při odpojení od nabíječky – 1,35V na článek) je 6,75V, při vybití (napětí 1,1V na článek) je jeho napětí 5,5V. Podle odhadu spotřeby a předpokládané provozní doby pak se stanoví jeho kapacita.

Stabilizátor

Stabilizátor napětí je potřebný pro udržování stabilního vstupního napětí, protože vstupní napětí z baterie se mění s teplotou a při vybíjení napětí postupně klesá. Použijí třibodový stabilizátor s pevným výstupním napětím a nízkým úbytkem napětí.

DC-DC měnič

Výrobce doporučuje provozní napětí GM trubice STS-5 v rozsahu 360-440V. Provozní napětí se volí obvykle v 1/3 pracovní charakteristiky GM trubice. Proto volím napětí 390V, které je možné vytvořit z baterie pomocí vhodného DC-DC měniče. S ohledem na proudy procházející trubicí okolo 44 μA (změřeno na fungujícím vzorku) není pro napájení trubice potřebný velký výkon. Měnič však musí mít výstupní napětí dobře stabilizováno. Důvod je ten, že navrhují přístroj, který má mít i výstup na digitální ukazatel, kde se zobrazuje intenzita ionizujícího záření (nejedná se jen o detekci záření). GM trubice má sklon plata 0,125% na 1V. Takový sklon není zrovna malý a ještě k tomu se mírně zvyšuje v průběhu používání trubice. Pokud by vstupní napětí nebylo stabilizováno, měnil by se tedy i počet impulzů za minutu, i když by se intenzita záření neměnila. Napětí také musí být v určitých mezích nastavitelné, abychom splnili požadavek na pokud možno neměnnou hodnotu provozního napětí zvolené GM trubice, tj. 390V.

Indikátor napětí baterie

Akumulátor nelze vybit pod určitou mez. Pokud se tak stane, hrozí jeho zničení. Proto je nutné mít v přístroji indikátor napětí akumulátoru, který vybití na určitou mez signalizuje. Pro signalizaci vybitého akumulátoru se používá komparátor, který porovnává hodnotu napětí baterie s požadovaným napětím (referenčním), které odpovídá vybité baterii. Tento stav je signalizován pomocí kontrolní LED. Pro jednoduchost se sleduje napětí celé baterie. Pokud by byl pro napájení tohoto zařízení použit lithiový akumulátor, musel by být pro sledování vybíjení použit balancér.

Kontrolka zapnutí přístroje

Kontrolní LED signalizuje zapnutí přístroje.

Tvarovací obvod

Tvarovacím obvodem se zajistí úprava impulzů. K měření četnosti impulzů je zapotřebí všechny impulzy upravit tak, aby bylo zajištěno spolehlivé zpracování signálu. Toto zajistí monostabilní klopný obvod s časovačem 555.

Zesilovač pro piezoměnič

Monofonní zesilovač. Zde lze použít vhodný integrovaný obvod nebo stačí i tranzistor zapojený jako emitorový sledovač.

Piezoměnič

Jako akustický indikátor intenzity záření je možno použít buďto miniaturní reproduktor nebo piezoměnič. Z hlediska geometrických rozměrů a ceny vychází jako výhodnější piezoměnič.

Diodová nábojová pumpa (DCP)

Převodník je potřebný pro převedení četnosti po sobě jdoucích impulzů na napětí, které se následně zobrazí na digitálním ukazateli.

Zesilovač

Umožňuje zesílit napětí, které zobrazuje indikátor. Má nastavitelné zesílení a umožňuje kalibraci přístroje.

Indikátor

Je požadován indikátor pro měření napětí s nízkou spotřebou. Zde lze použít např. digitální LCD panelové měřidlo WPB5035. Toto měřidlo má napájecí napětí 9V, které musí být galvanicky oddělené od měřících svorek. Toho lze dosáhnout např. pomocí DC-DC měniče s izolovaným výstupem. Jeho Vstupní odpor je větší než $1\text{M}\Omega$ [35] a ze zdroje odebírá proud 10mA (změřeno). Rozsah měřených napětí je do 1,999mV [35].

Měnič s izolovaným výstupem

Pro napájení digitálního voltmetru, který je součástí navrhovaného přístroje je nutné mít k dispozici napájecí napětí, které je izolováno od napětí měřeného. Pro tento účel lze použít izolační DC-DC měnič AM1D-0509S-RZ. Izolační napětí má mezi vstupem a výstupem 1000V a odpor mezi vstupem i výstupem $1000\text{M}\Omega$ [36]. Mezi výhody tohoto měniče patří velmi malé rozměry a také to, že nevyžaduje pro svoji činnost externí součástky. Pokud se použije LCD displej s podsvícením, pak je spotřeba tohoto voltmetru opravdu minimální (okolo 10mA).

7 Návrh měniče pro napájení GM trubice

7.1 Volba zapojení

Jako zdroj napětí pro napájení GM trubice je použit spínaný zvyšující měnič s transformátorem. Pro takové měniče existuje řada integrovaných obvodů, které obsahují veškerou potřebnou elektroniku pro jeho funkci. Z hlediska dostupnosti volím obvod MC34063A firmy On Semiconductor. Má jistá omezení. Vnitřní spínací tranzistor má maximální dovolený spínací proud 1,5A a maximální přípustné napájecí napětí je 40V [37]. Tento napěťový a proudový rozsah lze zvýšit použitím pomocného spínacího tranzistoru, jehož spínání je obvodem MC34063A řízeno. Zde nastal drobný problém s požadovanou velikostí napájecího napětí. Aby celý detektor záření nebyl příliš velký bylo zvoleno napájecí napětí okolo 6V. Z toho pak vyplynul požadavek na vlastnosti spínacího tranzistoru MOSFET. Řídící napětí „gate-source“ by mělo být okolo 4V a pokud by byla použita ve zdroji jenom tlumivka, pak by maximální dovolené napětí „drain-source“ mělo být alespoň okolo 500V, aby bylo možno tento tranzistor řídit obvodem MC34063A při napájecím napětí 5V. Vhodný tranzistor splňující tyto požadavky nebyl k dispozici. Z tohoto důvodu bylo zvoleno zapojení s transformátorem, jehož použití dovolilo snížit požadavek na maximální spínané napětí tranzistoru. Jako vhodný typ se ukázal MOSFET s kanálem N typ IRLZ34N. Původně bylo testováno zapojení tohoto měniče bez pomocného spínacího tranzistoru (pouze s použitím ochranné diody), ale když byly dva obvody MC34063A při pokusech zničeny, bylo zapojení měniče doplněno o spínací tranzistor a problém se spolehlivostí tím byl vyřešen.

7.2 Požadavky

Parametry, které musí měnič splňovat, jsou následující:

- Výstupní napětí nastavitelné na 390V a to s ohledem na použitou GM trubici STS-5. Její doporučené pracovní napětí je podle výrobce 360-440V. Napětí 390V je tedy zvolené provozní napětí z 1/3 pracovní charakteristiky GM trubice.
- Doporučený sériový rezistor pro tuto GM trubici je mezi 5-10M Ω .
- Pracuje na provozní napětí 5V, protože toto napájecí napětí je uvažováno i pro další části navrhovaného detektoru záření.
- Požadovaný výkon měniče je 0,058W (viz dále).

Stanovení požadovaného výkonu měniče:

Pro dolní mezní hodnotu zátěže, tj. 5M Ω při volbě existujících hodnot rezistorů R13 a R14 s odporem 2,7M Ω (viz kapitola 7.6) platí:

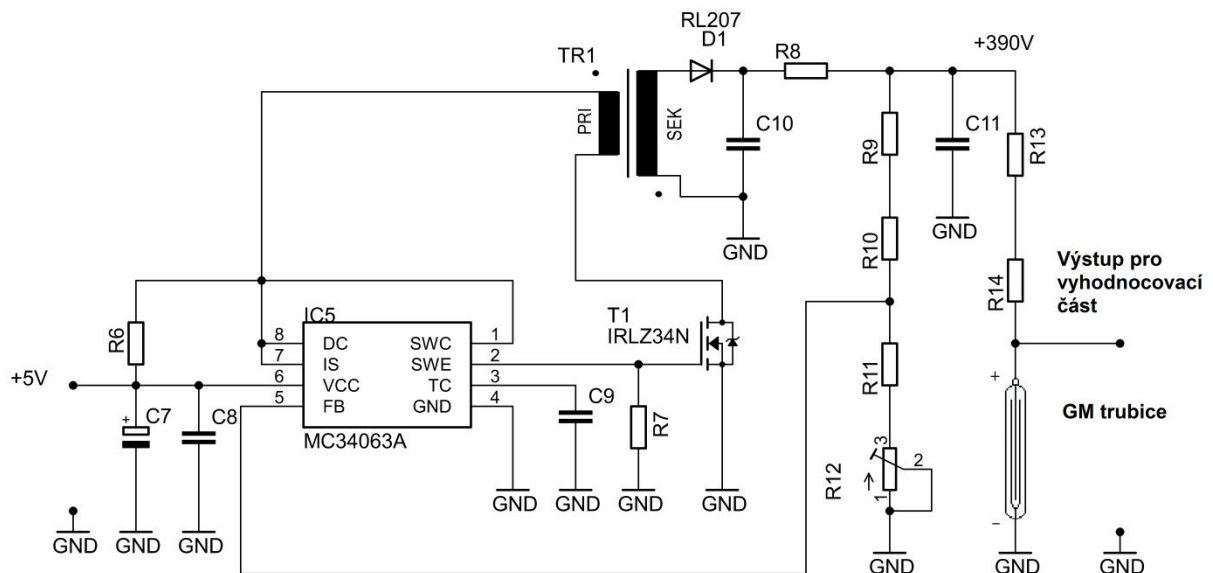
$$P_m = \frac{U_{vm}^2}{R_{z1}} = \frac{390^2}{2 \cdot 2,7 \cdot 10^6} = 0,028W, \quad (7.1)$$

kde P_m je výkon měniče, U_{vm} je výstupní napětí měniče a R_{z1} je odpor zátěže trubice. Část výkonu se ztratí i na děliči, který je zapojen ve smyčce zpětné vazby stabilizující výstupní napětí. Výkon ztracený na tomto děliči je roven:

$$P_d = \frac{U_{vd}^2}{R_{z2}} = \frac{390^2}{2 \cdot 2,7 \cdot 10^6} = 0,028W, \quad (7.2)$$

kde P_d je výkon ztracený na děliči, U_{vd} je výstupní napětí měniče a R_{z2} je součet rezistorů R9 a R10. Celkový požadovaný výkon měniče je tedy 0,056W.

7.3 Principiální popis činnosti

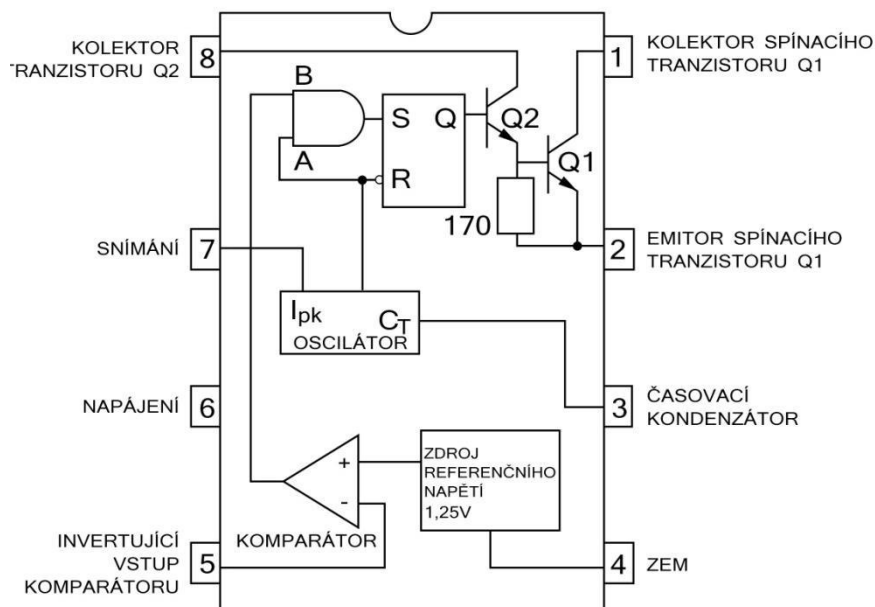


Obr. 7-1 Návrh DC-DC měniče 390V

Na obr. 7-1 je navrhnuté schéma zapojení DC-DC měniče, který vytváří výstupní napětí 390V. Tento DC-DC měnič je napájen napětím 5V. Důležitou součástí tohoto měniče je integrovaný obvod MC34063A [38], který obsahuje všechny funkce vyžadované pro spínané DC-DC měniče, jehož součástí jsou následující části (viz obr. 7-2):

- Napěťový komparátor,
- teplotně kompenzovaný zdroj referenčního napětí,
- oscilátor,
- aktivní omezovač proudu,

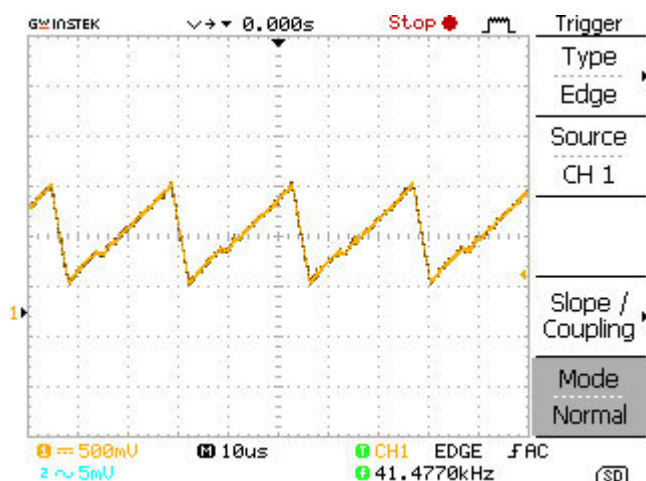
- výstupní spínač.



Obr. 7-2 Integrovaný obvod MC34063A [39]

Oscilátor obsahuje zdroj proudu a proudovou zátěž. Zdroj proudu a proudová zátěž střídavě nabíjejí a vybíjejí externí časovací kondenzátor C9, na kterém se vytváří pilovitý průběh, kde poměr doby vzrůstající části k části klesající je 6:1. Na obr. 7-3 je tento pilovitý průběh znázorněn.

Poznámka – obrázky časových průběhů uvedené dále v textu byly získány měřením na funkčním vzorku.



Obr. 7-3 Pilovitý napěťový průběh vytvořený na kondenzátoru C9

Externí časovací kondenzátor C9 určuje kmitočet oscilátoru, který ovlivňuje spínání tranzistoru Q1. Rychlost spínání se mění na základě omezení proudu tranzistorem Q1 (nesmí

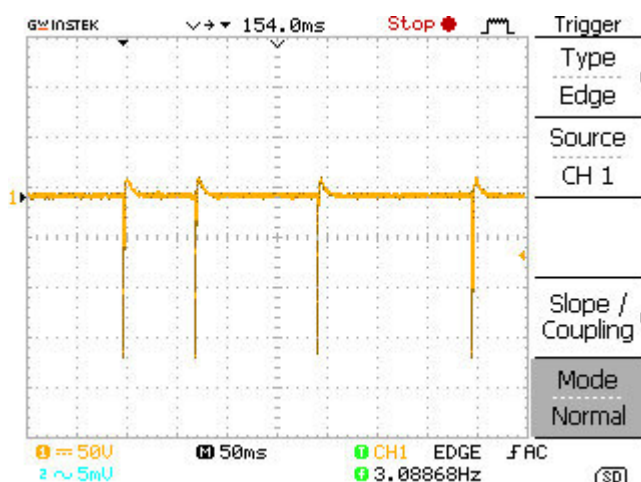
přesáhnout hodnotu 1,5A) a na základě stabilizace výstupního napětí 390V sekundárního vinutí transformátoru.

Přes externí rezistor R6, který je připojen mezi pin 6 a pin 7 integrovaného obvodu, protéká proud zátěží (v tomto případě primární vinutí transformátoru). Úbytek napětí na tomto rezistoru je snímán přes pin 7. Pokud hodnota úbytku napětí dosáhne 330mV, tak se změní kmitočet oscilátoru, a tím se změní rychlost spínání tranzistoru Q1 a následkem toho se omezí jeho proud.

Pro stabilizaci výstupního napětí sekundárního vinutí spínaného transformátoru má Integrovaný obvod MC34063A vlastní stabilizační systém, jehož součástí je komparátor, který porovnává hodnotu 1,25V ze zdroje referenčního napětí s výstupním napětím externího napěťového děliče. Pokud není na výstupu sekundárního vinutí transformátoru požadovaných 390V, tak výstupní napětí napěťového děliče není rovno 1,25V a pomocí smyčky zpětné vazby se stabilizované napětí upraví.

Protože je tento integrovaný obvod relativně dost citlivý na jakékoliv přetížení jeho spínacího tranzistoru Q1 (napěťově i proudově), tak byl do schématu zapojení přidán pomocný spínací tranzistor, který celkovou spolehlivost obvodu zvyšuje.

Při správné funkci DC-DC měniče, kdy na výstupu sekundárního vinutí transformátoru je napětí 390V, GM trubice je připravena k detekci ionizujícího záření. Na obr. 7-4 jsou zobrazeny impulzy, které vznikají při vniku ionizujícího záření do GM trubice. Tento časový průběh byl změřen osciloskopem se vstupním odporem 1 M Ω přes oddělovací kondenzátor 100pF/600V. Následně jsou impulzy zpracovávány pomocí vyhodnocovací části přístroje.



Obr. 7-4 Impulzy vznikající při vniku ionizujícího záření do GM trubice

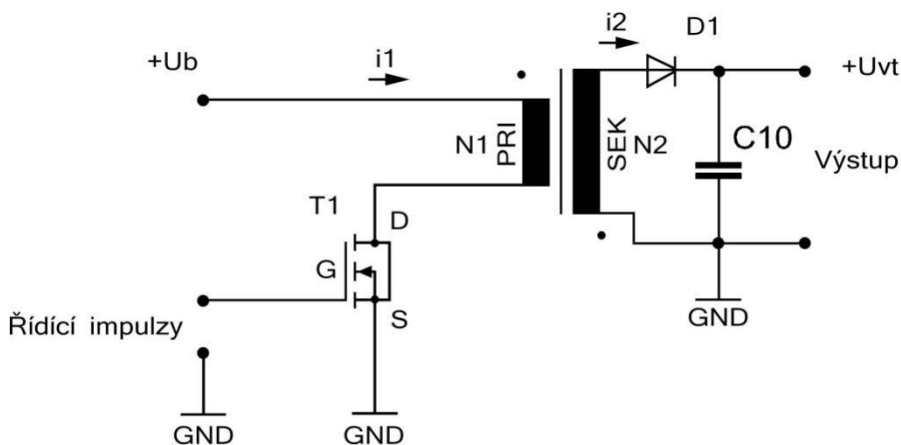
Z tohoto obrázku je také patrný úbytek napětí okolo 150V na trubici, která byla vybuzena ionizujícím zářením. Proud procházející trubicí je roven:

$$I_t = \frac{U_{vm} - U_{ubyt}}{R_{z1}} = \frac{390 - 150}{5,4 \cdot 10^6} = 44,4 \mu A, \quad (7.3)$$

kde I_t je proud procházející trubicí, U_{vm} je výstupní napětí měniče, U_{ubyt} je úbytek napětí na trubici a R_{z1} je odpor zátěže trubice.

7.4 Návrh impulzového transformátoru

Vzhledem k tomu, že v DC-DC měniči, který musí být schopen dodat napětí 390V nutné pro napájení GM trubice bylo použito zapojení s impulzovým transformátorem, který bylo nutno navrhnout. Jádru pro tento typ měniče musí mít vzduchovou mezeru. Principiálně by bylo možno tento měnič navrhnout i s tlumivkou, ale nastal problém s dostupností vhodného spínacího tranzistoru. Proto byla volba zapojení jednoznačná.



Obr. 7-5 Princip činnosti blokujícího měniče

Poznámka – tečky u cívek transformátoru vyznačují začátky vinutí, N1 je počet závitů primárního vinutí a N2 je počet závitů sekundárního vinutí transformátoru.

Na obr. 7-5 je zobrazen princip činnosti blokujícího měniče. Tranzistor T1 pracuje jako spínač, který je řízen impulzy z řídicího obvodu měniče. V tomto případě je to obvod MC34063A. Tento řídicí obvod obsahuje i spínací tranzistor Q1. Pokud však jeho parametry z jakýchkoliv příčin nevyhovují, je možno použít externí tranzistor. Pro tuto funkci se velmi často používají tranzistory řízené polem, které mají z hlediska spínání velmi dobré vlastnosti.

Během doby $t1$ (doba sepnutí tranzistoru) je na primárním vinutí tranzistoru napětí ze vstupního zdroje (úbytek napětí D-S je na sepnutém tranzistoru relativně malý). V této době lineárně narůstá proud primárním vinutím. V průběhu $t1$ je proud sekundárním vinutím nulový, protože v této době je dioda D1 pólována v nepropustném směru. V okamžiku, když je tranzistor vypnut (řídicí signál je roven nule), proud primárním vinutím se přerušuje, napětí na sekundárním vinutí změní polaritu, dioda D1 nyní sepne a energie z indukčnosti

transformátoru nabije kondenzátor C10 (uplatní se Faradayův indukční zákon). Na primárním vinutí vznikne při uzavření tranzistoru T1 překmit, jehož velikost má amplitudu [52]:

$$U_{DS} = U_b + \frac{N1}{N2} \cdot U_{vt}, \quad (7.4)$$

kde U_{DS} je napětí mezi „drain“ a „source“ tranzistoru MOSFET, U_b je napájecí napětí (5V), $N1$ je počet závitů primárního vinutí, $N2$ je počet závitů sekundárního vinutí a U_{vt} je výstupní napětí sekundárního vinutí transformátoru.

Spínací tranzistory používané v měničích mívají v řadě případů zabudováván diodu, která je před těmito napěťovými špičkami chrání. Je i v tranzistoru uvedeném v principiálním schématu měniče (viz obr. 7-5).

Vzhledem k tomu, že v době $t1$ se v indukčnosti transformátoru hromadí energie, která se v době $t2$ (doba vypnutí tranzistoru) dodává do kondenzátoru na výstupu, chová se vlastně tento transformátor jako akumulární tlumivka se dvěma vinutími. Z toho, co bylo řečeno je zřejmé, že o tom, jaká energie se akumuluje v transformátoru v době $t1$ rozhoduje indukčnost primárního vinutí. Pro vstupní energii primárního vinutí W je možné napsat vztah [52]:

$$W = U_b \cdot \frac{i1}{2} \cdot \frac{5}{6} \cdot T, \quad (7.5)$$

kde U_b je napájecí napětí (5V), $i1$ je proud primárním vinutím transformátoru a T je perioda řídicích impulsů.

Poznámka - konstanta $5/6$ vychází z vlastností řídicích impulsů obvodu MC34063A, kde doba $t1$ (doba sepnutí tranzistoru Q1) je $5/6$ periody a doba $t2$ (doba rozepnutí tranzistoru Q2) je rovna $1/6$ periody (viz katalogový list výrobce).

Tento DC-DC měnič může v podstatě pracovat ve dvou módech:

- Nespojité proudový mód,
- spojitý proudový mód.

U nespojitého módu klesá proud primárním vinutím až k nule a mezi dalším zapnutím spínače a předchozím vypnutím spínače je v každé periodě pauza. U spojitého módu tomu tak není. U spojitého módu jsou na výstupu měniče menší rušivé špičky a navíc jsou při provozu měniče v tomto módu i menší ztráty.

Aby měnič plnil dobře svoji funkci, je nutno v průběhu sepnutí t_I nashromáždit v indukčnosti L_I dostatečně velké množství energie pro její následný přenos v další fázi činnosti měniče do kondenzátoru C10. Napětí na kondenzátoru C10 nesmí kolísat, ale musí mít stálou hodnotu, jejíž velikost odpovídá použité GM trubici. To lze zajistit pomocí řídicího obvodu, který upravuje svoji činnost právě na základě změn napětí na výstupu měniče, které jsou vhodným způsobem snímány a přivedeny na komparátor integrovaného obvodu. Aby však tato smyčka zpětné vazby ovládající výstupní napětí mohla správně fungovat, musí se v transformátoru v době t_I nashromáždit větší množství energie, než je potřeba. Správné množství energie se pak nastavuje časováním spínání tranzistoru T1. Pokud by tato podmínka nebyla splněna, stabilizace výstupního napětí by nefungovala. Pro návrh transformátoru se musí udělat především tyto kroky:

- Určit typ jádra (a materiál, ze kterého je vyrobeno) a to s ohledem na předpokládaný pracovní kmitočet a požadovaný výkon měniče.
- Indukčnost primárního vinutí transformátoru s ohledem na energii, kterou potřebujeme akumulovat v době t_I a to i s přiměřenou rezervou nutnou pro možnost regulace výstupního napětí měniče. Zde je nutno dodržet přiměřené sycení jádra. Pokud by se totiž jádro přesytilo, transformátor by přestal pracovat.
- Stanovit počet závitů sekundárního vinutí.
- Určit průřezy vodičů pro primární a sekundární vinutí s ohledem na proudy, které jimi mají protékat.
- Zkontrolovat, zda se nám obě vinutí s příslušnou izolací vejdou do okénka vybraného jádra. Pokud ne, pak je nutno vybrat větší jádro, aby bylo vinutí realizovatelné.

Návrh transformátoru DC-DC měniče vychází z aplikační poznámky AN920D firmy ON Semiconductor (viz str. 30) s využitím literatury [52]. Pro jeho realizaci bylo použito hrníčkové jádro. Hrníčkové jádro má několik výhod. Je menším zdrojem rušení a vinutí transformátoru je nad vzduchovou mezerou. Výhodou je rovněž snadná montáž na desku, protože ho lze upevnit jedním centrálním šroubem. Nevýhodou je malé okénko vzhledem k rozměrům magnetického obvodu. Z tohoto pohledu by bylo např. jádro EE z hlediska rozměrů okénka pro vinutí vzhledem k rozměrům magnetického obvodu vhodnější. Byly by zde i menší ztráty. S ohledem na nepatrný výstupní výkon požadovaný pro napájení GM trubice nebyly v případě tohoto měniče ztráty rozhodující. Proto bylo zvoleno hrníčkové jádro. V současné době je ale problém se zajištěním těchto jader, protože výroba PRAMET Šumperk byla ukončena. Na internetu se dají zakoupit zbytky z ukončené výroby, avšak v běžných prodejnách součástek už hrníčková jádra k dispozici ve větším výběru nejsou. Ještě větší je problém s feritovými jádry jiných tvarů. S ohledem na minimální požadovaný výkon je podstatná plocha okénka jádra, určující jestli bude možné vinutí do požadovaného prostoru umístit.

Transformátor uvedený v aplikační poznámce má indukčnost primárního vinutí 140μH [39]. Tato hodnota byla použita a na cívku vybraného hrníčkového jádra jsme navinuli 10 závitů. Po změření indukčnosti bylo zjištěno, že primární vinutí musí mít 20 závitů. Požadovaný výstupní výkon je velmi malý. Rozhodující je tedy v tomto případě rozměr okénka.

Výpočet převodu transformátoru

Pro převod transformátoru blokujícího měniče platí následující vztah [52]:

$$n = \frac{U_b}{U_{vt}} \cdot \frac{D}{1 - D}, \quad (7.6)$$

kde U_b je napájecí napětí, U_{vt} je výstupní napětí ze sekundárního vinutí transformátoru (napájecí napětí GM trubice), D je střída a n je převod transformátoru, pro který platí:

$$n = \frac{N1}{N2}, \quad (7.7)$$

kde $N1$ je počet závitů primární vinutí a $N2$ je počet závitů sekundárního vinutí.

Pro výpočet převodu navrhovaného transformátoru jsou důležité hodnoty $U_b=5V$, $U_{vt}=390V$, $D=0,833$. Podle vztahu (7.6) je převod transformátoru roven:

$$n = \frac{5}{390} \cdot \frac{0,833}{1 - 0,833} = 0,064, \quad \frac{1}{n} = 15,6.$$

Po zaokrouhlení na nejbližší vyšší číslo bude počet sekundárních závitů tedy:

$$N2 = N1 \cdot \frac{1}{n} = 20 \cdot 16 = 320 \text{ závitů}. \quad (7.8)$$

Indukčnost primárního vinutí (tím i počet jeho závitů) byla převzata z aplikační poznámky AN920/D [39] a byla uvažována pro sycení jádra 0,2T.

Volba jádra a cívky

Z hlediska přeneseného výkonu by vyhovělo např. i hrníčkové jádro P18x11. To přenese při kmitočtu 20kHz výkon 5,3W, což je pro tento případ více než dostačující. Plocha okénka (bez vložené cívky) je ovšem pouze 20,44mm². Přehledně to uvádí následující tabulka (Tab.1).

Tab. 1 Hrníčkové jádro P18x11 – hmota H21 [16]

Prostor okénka	Hodnota	Jednotky
$A=2 \cdot h_2$	5,60	mm
$B=(d_2-d_3)/2$	3,65	mm
Plocha okénka	20,44	mm ²
Plocha okénka cívky	16,07	mm ²
Průměr drátu	0,08	mm
Plocha průřezu drátu	0,01	mm ²
Činitel plnění	0,10	
Závitů celkem	319,77	

Uvedené hrníčkové jádro vyhovuje z hlediska přeneseného výkonu. Nevyhovuje však plocha okénka. Je totiž nutno uvážit, že na cívce bude ještě jedno vinutí ze silnějšího drátu. Bylo by nutno volit slabší drát. Je možné se podívat na jádro, které je další v řadě, a to hrníčkové jádro P26x16. V následující tabulce (Tab. 2) jsou jeho příslušné parametry.

Tab. 2 Hrníčkové jádro P26x18 - hmota H21 [16]

Prostor okénka	Hodnota	Jednotky
$A=2h_2$	11,00	mm
$B=(d_2-d_3)/2$	4,85	mm
Plocha okénka	53,35	mm ²
Plocha okénka cívky	36,00	mm ²
Průměr drátu	0,08	mm
Plocha průřezu drátu	0,01	mm ²
Činitel plnění	0,10	
Závitů celkem	716,56	

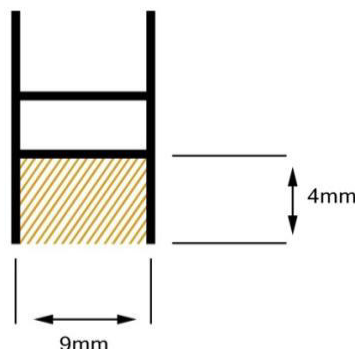
Plocha okénka vyhovuje. Toto jádro přenese při kmitočtu 20kHz výkon 17,5W. Volím tedy hrníčkové jádro s těmito parametry:

- Průměr jádra: 26mm,
- konstanta: AL 650,
- mezera: 0,1mm.

Výpočet počet plochy okénka

Užitečná plocha okénka je ovlivněna použitou cívkou. Pro vinutí je použit smaltovaný drát. Jelikož je jeho maximální hodnota mezizávitového napětí 60V, tak v každé vrstvě vinutí musí být prokladová izolace. To znamená, že lze počítat s činitelem plnění okénka

maximálně 20% (vzato z praxe) a při více vinutích ještě méně. Rozměry cívkového tělíska jsou na obr. 7-6.



Obr. 7-6 Schéma použité cívky (užitečná plocha okénka je vyšrafována)

Z obr. 7-6 je patrné, že plocha okénka je rovna:

$$S = 9 \cdot 4 = 36 \text{ mm}^2. \quad (7.9)$$

Volba vodičů

Pro primární vinutí volím smaltovaný vodič o průměru 0,3mm. Při proudové hustotě $2,5 \text{ A/mm}^2$ ním může protékat proud 176mA, při proudové hustotě $3,15 \text{ A/mm}^2$ proud 220mA [56]. To je více než dostačující. Proud děličem I_1 pro stabilizaci výstupního napětí je roven:

$$I_1 = \frac{U_{vst}}{R_{13} + R_{14}} = \frac{390}{5,4 \cdot 10^6} = 72,2 \mu\text{A}, \quad (7.10)$$

kde U_{vst} je výstupní napětí sekundárního vinutí transformátoru.

Poznámka – Hodnoty rezistorů R_{13} a R_{14} jsou vypočteny v kapitole 7.6.

Pro zátěž (GM trubice a dělič pro stabilizaci výstupního napětí) je celkový proud I ze sekundárního vinutí roven:

$$I = I_1 + I_t = 72,2 \cdot 10^{-6} + 44,4 \cdot 10^{-6} = 116,6 \mu\text{A}, \quad (7.11)$$

kde I_t je proud trubicí při vybuzení ionizujícím zářením (viz kapitola 7-3). Pro proud 0,1166mA by bylo možno použít při proudové hustotě 1 A/mm^2 smaltovaný vodič o průměru 0,02mm [56]. To je ale velmi tenký drát, který se velmi snadno trhá a navinout vinutí pomocí tak tenkého vodiče je obtížné. Proto volím průřez 0,08mm. Vinutí ze smaltovaného drátu s tímto průměrem je již realizovatelné.

Kontrola počtu závitů v okénku vybraného jádra

Při volbě vodiče sekundárního vinutí s průřezem 0,08mm, se nyní musí spočítat, kolik závitů sekundárního vinutí je možné do uvažované cívky umístit. Pro výpočet platí:

$$Z = \frac{S_{oc}}{\pi \cdot r^2} \cdot CP = \frac{36 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 0,04^2 \cdot 10^{-3}} \cdot 0,1 = 716,2 \text{ závitů}, \quad (7.12)$$

kde Z je celkový počet závitů sekundárního vinutí, které je možno do cívky umístit. S_{oc} je plocha okénka cívky, r je poloměr drátu a CP je činitel plnění 10% (vzato z praxe). Protože je nutné, aby se do plochy okénka vešlo 320 závitů sekundárního vinutí a 20 závitů primárního vinutí, včetně izolace mezi primárním vinutím a sekundárním vinutím (viz výše), tak je uvažovaná cívka dostačující. [52] [53] [54]

7.5 Volba ostatních součástek

Rezistor R6 omezuje maximální proud 1,5A, aby se nezničil spínací tranzistor Q1 v integrovaném obvodu MC34063AP. Jeho hodnota 0,24Ω je navržena v aplikačních poznámkách [39].

Volím elektrolytický kondenzátor C7 s hodnotou 220μF, který blokuje zdroj a k tomu paralelně zapojený foliový kondenzátor C8=100nF, který zachycuje vyšší kmitočty. Pomocí kondenzátoru C9 se nastavuje kmitočet oscilátoru. Tento kondenzátor je navrhnout v aplikačních poznámkách s hodnotou kapacity 680pF [39]. Na rezistoru R7 vzniká úbytek napětí pro řízení MOSFET tranzistoru T1 IRLZ34N. Jeho hodnotu odporu volím 200Ω. Relativně nízkou hodnotu volím s ohledem na vstupní kapacitu tranzistoru MOSFET, která je v tomto případě 880pF [40]. Spínání tohoto tranzistoru bylo ověřeno měřením na zkušebním vzorku měniče.

Tranzistor T1 ochraňuje integrovaný obvod MC34063A, kdy může docházet při přerušení průtoku proudu primárním vypnutím k přechodným dějům (může dojít k vytvoření záporných napěťových špiček).

Na výstupu sekundárního vinutí impulzového transformátoru měniče je zapojen jednocestný usměrňovač tvořený diodou D1 a kondenzátorem C10. Dioda D1 musí mít minimální dovolené inverzní napětí minimálně 800V (dvojnásobek provozního napětí trubice). Proud, který diodou protéká, je velmi malý (s výjimkou krátkého přechodného děje při zapnutí přístroje). Tvoří jej proud procházející GM trubicí a proud děličem, který slouží ke stabilizaci výstupního napětí měniče. Volím diodu RL207, která má inverzní napětí 1000V [41]. Kondenzátor C10 musí být na napětí vyšší než 400V s ohledem na nutnost případného přepětí při nastavování napětí na výstupu tohoto zdroje. Volím foliový kondenzátor 1μF/630V.

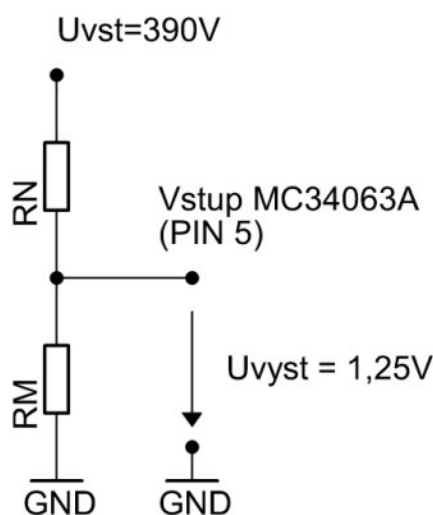
Rezistor R8 a kondenzátor C11 slouží jako filtr pro vyhlazení napětí, které vychází ze sekundárního vinutí transformátoru. Eliminuje špičky vznikající při činnosti měniče. Rezistor R8 má hodnotu $82\text{k}\Omega$. Tato hodnota je výrazně menší, než hodnota zatěžovacího odporu výstupu měniče. Kapacita kondenzátoru C11 je $0,1\mu\text{F}$. Dělič, pomocí kterého je získáváno napětí pro regulační smyčku tohoto zdroje, je připojen na výstup filtru. Proto bude na výstupu filtru napětí 390V , které potřebujeme pro napájení GM trubice. Filtr byl vyzkoušen experimentálně a vyhovuje.

Podle doporučení výrobce GM trubice STS-5 je odpor zátěže v rozmezí $5\text{--}10\text{M}\Omega$. Zde je nutno počítat s tím, že napájecí napětí GM trubice má hodnotu 390V . Běžné metalizované rezistory na zatížení $0,6\text{W}$ mají maximální dovolené pracovní napětí 350V a krátkodobě mohou být zatíženy na 700V (hodnoty převzaty z datového listu výrobce rezistorů). Je možné volit rezistor na ještě vyšší zatížení, nebo použít více stejných rezistorů na zatížení $0,6\text{W}$ zapojených do série. Proudové zatížení (a tím i výkonová ztráta) je velmi malé. Proud trubicí je okolo $40\mu\text{A}$ (viz kap. 7-4) a zhruba stejný proud protéká i děličem pro nastavení výstupního napětí. Z toho důvodu volím dva metalizované rezistory R13 a R14 o hodnotě odporu $2,7\text{M}\Omega$, typ RM 2M7 0207 $0,6\text{W}$ (označení podle katalogu GM electronics). Odpor zátěže bude tedy $5,4\text{M}\Omega$, což odpovídá doporučenému rozsahu.

7.6 Výpočet součástek

Poznámka - Předpokládám, že součástky, jejichž hodnoty budou v této bakalářské práci vypočteny, musí být zaokrouhleny do existující řady (např. trimry se vyrábějí jen v dosti omezené řadě hodnot). Je potřebné počítat ještě s tím, že součástky mají určitou toleranci.

Výpočet napěťového děliče



Obr. 7-7 Schéma zjednodušeného napěťového děliče

Pro stabilizaci výstupního napětí DC-DC měniče 390V, které slouží pro správné fungování GM trubice, má integrovaný obvod MC34063AP vlastní stabilizační systém, jehož součástí je zdroj referenčního napětí 1,25V a komparátor, který toto referenční napětí porovnává s výstupním napětím externího napěťového děliče. Pokud bude na výstupu sekundárního vinutí transformátoru napětí rovno 390V, na výstupu napěťového děliče je potřebné nastavit napětí 1,25V.

Pro výpočet napěťového děliče, který je složen z rezistoru R_N a R_M je na obr. 7-7 nakreslené zjednodušené schéma. Volím příčný proud děličem I_D například $70\mu A$. Tato hodnota je dostačující, protože vstupní svodový proud komparátoru je $20nA$ [37]. Pro celkový odpor děliče R_D platí:

$$R_D = \frac{U_{vst}}{I_D} = \frac{390}{7 \cdot 10^{-5}} = 5,57M\Omega, \quad (7.13)$$

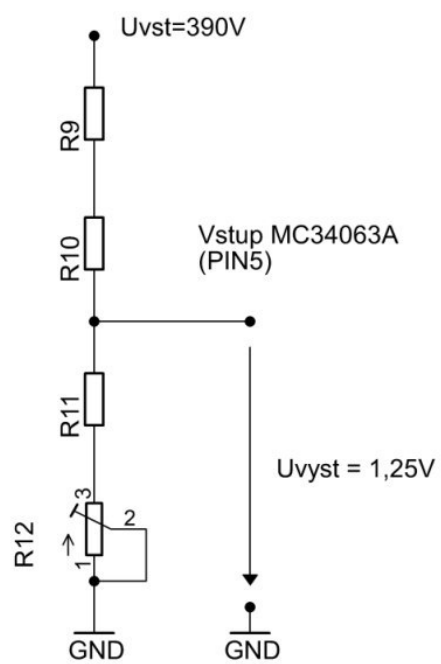
kde U_{vst} je napětí vycházející ze sekundárního vynutí transformátoru. Rezistor R_N se rozdělí z důvodu provozního napětí na rezistory dva, protože běžné metalizované rezistory na zatížení 0,6W mají maximální dovolené pracovní napětí 350V, zde však musí být rezistory minimálně s dovoleným pracovním napětím 400V. Volím pro oba rezistory R_9 a R_{10} hodnotu odporu $2,7M\Omega$, což je hodnota existující. Výstupní napětí děliče $U_{výst}$ se vypočítá podle vzorce:

$$U_{výst} = \frac{R_M}{R_N + R_M} \cdot U_{vst}, \quad (7.14)$$

Pro výpočet rezistoru R_M dle vztahu (7.14) tedy platí:

$$R_M = \frac{U_{výst} \cdot R_N}{U_{vst} - U_{výst}} = \frac{1,25 \cdot 5,4 \cdot 10^6}{390 - 1,25} = 17,4k\Omega.$$

Rezistor R_M je možné sestavit pomocí existujících součástek, a to rezistoru R_{11} , jehož hodnota odporu je $15k\Omega$ a z trimru R_{12} s hodnotou $5k\Omega$, pomocí kterého je možné hodnotu $17,4k\Omega$ bez problému nastavit a tím získat na výstupu napěťového děliče napětí 1,25V (při $U_{vst}=390V$). Na obr. 7-8 je názorně vidět výsledné zapojení napěťového děliče.



Obr. 7-8 Schéma navrhnutého napěťového děliče

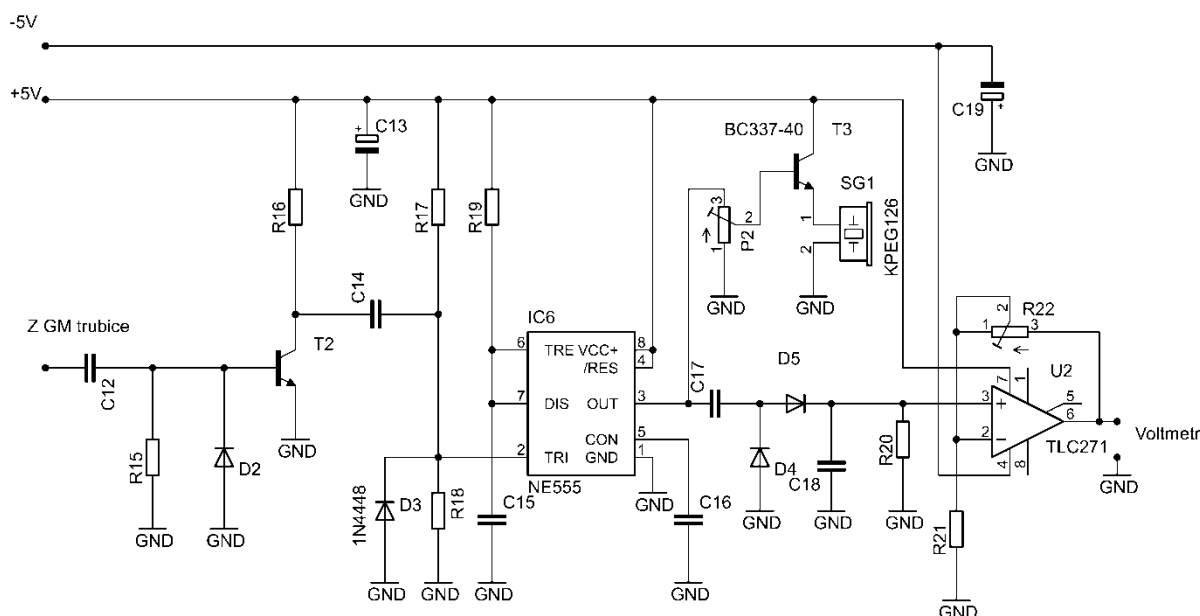
8 Vyhodnocovací část

8.1 Požadavky

V předchozí části je pomocí spínaného zdroje, který má na výstupu 390V, napájen obvod GM trubice, pomocí kterého se získávají impulzy, jejich četnost odpovídá intenzitě ionizujícího záření. GM trubice má do série zapojen vysokohmový rezistor, jehož úkolem je omezit proud trubicí na hodnotu, která je předepsána výrobcem. Na vyhodnocovací část přístroje je požadováno následující:

- Upravení výstupních impulzů z GM trubice na impulzy s konstantní dobou trvání a konstantní amplitudou.
- Vytvoření akustického signálu, jehož frekvence signalizuje intenzitu dopadajícího záření. Je také potřeba zaručit, aby impulzy odebírané pro akustickou signalizaci nezatěžovaly obvod, který je vytváří. Opakovací kmitočet vytvořeného akustického signálu souvisí s tím, kolik ionizujících částic vniklo do GM trubice. Pro nastavení hlasitosti je zde zapotřebí zesilovač s nastavovacím prvkem, který nastaví proud procházející akustický měničem podle podmínek, které jsou v katalogovém listu.
- Nesmí být ovlivněna velikost výstupních impulzů z časovače, ty totiž tvoří vstup diodové nábojové pumpy, která je zde ve funkci převodníku kmitočet/napětí.
- Vyhodnocovací část přístroje bude obsahovat i indikátor intenzity ionizujícího záření. Pro indikátor musí být použit převodník, který z kmitočtu po sobě jdoucích impulzů vytvoří výstupní napětí úměrné intenzitě záření.
- Pro kalibraci indikátoru se výstupní napětí převodníku upraví následným zesilovačem tak, aby číselně souhlasila stupnice voltmetru, který se připojí na výstup navrhovaného zařízení.

8.2 Principiální popis činnosti



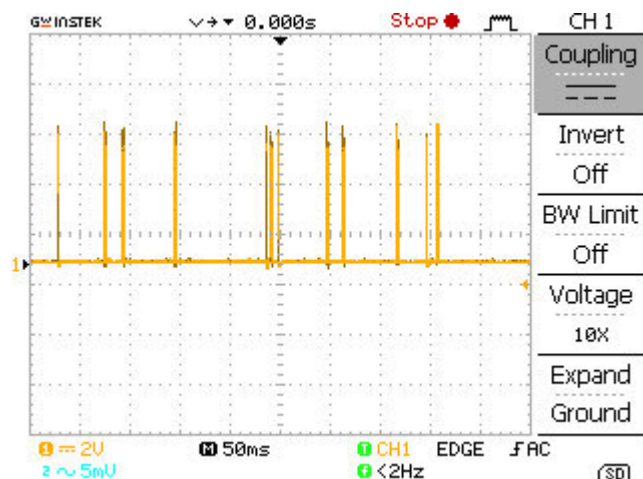
Obr. 8-1 Návrh vyhodnocovací části přístroje

Na obr. 8-1 je návrh schématu vyhodnocovací části přístroje. Předchozí definované podmínky jsou realizovány následovně. Vyhodnocovací část je napájena symetricky napětím $\pm 5V$. Při vniku ionizujícího záření do GM trubice se vytváří impulzy, které jsou pomocí RC članku derivovány. Z důvodu maximálního dovoleného inverzního napětí tranzistoru 5V jsou derivované impulzy ořezány pomocí diody D2. Výstupní průběh napětí je znázorněn na obr. 8-2.



Obr. 8-2 Impulzy spínající tranzistor T2

Kladné špičky zobrazeného průběhu napětí spínají tranzistor T2. Tento tranzistor vytváří impulzy pro spouštění monostabilního klopného obvodu tvořeného časovačem 555, jehož výstupem jsou impulzy s konstantní dobou trvání a konstantní amplitudou.



Obr. 8-3 Impulzy vycházející z monostabilního klopného obvodu

Vytvořené impulzy (viz obr. 8-3) jsou použity pro dva účely:

- Impulzy přicházejí na vstup diodové nábojové pumpy (DCP), kde jsou kmitočtově demodulovány. Výstupem je napětí, které je přímo úměrné frekvenci přicházejících impulzů, tedy odpovídá intenzitě ionizujícího záření.
- Impulzy jsou vedeny do piezoelektrického měniče, který je zdrojem akustického signálu, jehož kmitočet udává intenzitu ionizujícího záření. Aby výstupní impulzy nebyly ovlivněny připojením dalšího zařízení, proto je do obvodu zapojen jednoduchý emitorový sledovač, který bude piezoelektrický měnič napájet.

Měřidlo, které slouží jako indikátor intenzity záření, je kalibrovatelné pomocí připojeného neinvertujícího operačního zesilovače, u něhož je možné nastavit zesílení.

8.3 Volba součástek

Poznámka - Jelikož se jedná o bateriově napájené zařízení, je nutné vybrat obvody úsporné, tj. s malou spotřebou proudu.

Vazební kondenzátor C12 slouží pro oddělení obvodu GM trubice a vyhodnocovací části. Také tvoří RC článek s rezistorem R15, který impulzy z GM trubice derivuje. Hodnotu kondenzátoru C12 volím 100pF. Měřením na vzorku bylo zjištěno, že tato hodnota vyhovuje. Tento kondenzátor musí být na provozní napětí větší jak 400V (podle katalogu a dostupnosti jsme zvolili napětí 630V). Rezistor R15 snižuje zbytkový proud Q1, když je tento tranzistor uzavřen. Jeho hodnotu volím 120kΩ (měřením na vzorku byla ověřena jeho funkčnost).

Dioda D2 je ochranná, protože odstraňuje záporné špičky vycházejících z kondenzátoru C12 (tranzistor T2 má maximální dovolené inverzní napětí báze-emitor 5V) [42]. Kladné napěťové špičky spínají tranzistor T2. Ten pracuje jako spínač ovládaný

impulzy z GM trubice. Jeho maximální proud (v případě kdy je sepnut) určuje Rezistor R16. Vhodným typem pro tento tranzistor se jeví např. NPN tranzistor BC337-40.

Kondenzátory C13 a C19 zde slouží k blokování napájení. Pro tyto účely obvykle bývají používány elektrolytické kondenzátory s hodnotou do 100 μ F. Kondenzátory by měly být na desce umístěny co nejbližší časovači NE555. Zabraňují nežádoucímu ovlivnění činnosti obvodů impulzovým rušením (např. ze zdroje napětí 390V).

Dioda D3 slouží jako ochrana vstupu komparátoru nízké úrovně časovače před zápornými impulzy. Zde lze použít univerzální rychlou diodu. Vhodná je např. 1N4448.

Impulzy s konstantní amplitudou a dobou trvání jsou vytvářeny pomocí monostabilního klopného obvodu, pro která použiji časovač 555. Jsou k dispozici dvě varianty. První z nich je z bipolárních tranzistorů, druhá pak z tranzistorů unipolárních. Z hlediska spotřeby je výhodnější použít unipolární verzi (např. obvod TS55), kde výrobce udává při napájení 5V vlastní spotřebu (bez zátěže – viz katalogový list) 110 μ A.

Kondenzátor C16 slouží k blokování řídicího vstupu časovače před nežádoucím rušením. Jeho použití je výrobcem obvodu doporučeno. Obvyklá hodnota je 100nF.

Tranzistor T3 volím typ BC337-40 v pouzdře TO-9. Jedná se o NPN tranzistor s maximálním kolektorovým proudem 800mA [42], který je vhodný pro spínací účely.

Jako akustický indikátor ionizujícího záření může být použit piezoměnič nebo reproduktor. Volím piezoměnič, protože z hlediska geometrických rozměrů a ceny vychází jako výhodnější. Zde existují dva typy, a to měniče s vnitřní elektronikou a bez elektroniky. Měniče s vnitřní elektronikou potřebují pro svoji činnost pouze stejnosměrné napájecí napětí, pro měniče bez vnitřní elektroniky je nutno vhodný obvod vytvořit. U měničů s vnitřní elektronikou je nutno počítat s tím, že po jejich zapnutí existuje krátký přechodný děj, který způsobí, že měnič správně funguje až po jistém časovém zpoždění. Nehodí se tedy pro spínané aplikace. Navíc žádný výrobce dobu trvání tohoto přechodného děje neuvádí, proto volím piezoměnič bez vnitřní elektroniky. Pro tento účel může docela dobře vyhovět piezoměnič KPE126 s vnější elektronikou a spotřebou do 10mA [43]. Tento piezoměnič je buzen impulzy z monostabilního klopného obvodu, který napájí DCP. Aby nebyl výstup klopného obvodu zatížen (při zatížení by se snížila velikost jeho výstupních impulzů, což by ovlivnilo velikost napětí na výstupu DCP), volím také pomocný emitorový sledovač, který tento nežádoucí jev vyloučí.

Protože se pracuje s relativně nízkou úrovní signálu, tak na diody použité v napět'ovém zdvojovači nejsou z hlediska maximálního dovoleného inverzního napětí kladeny žádné zvláštní požadavky. Výhodnější jsou s malým prahovým napětím, proto je vhodné pro DCP použít Schottkyho diody.

Pro výstupní zesilovač volím operační zesilovač TLC271. Je to zesilovač v pouzdře DIL8. Podle výrobce je napájecí proud (při výstupu naprázdno) proud 0,9mA.

Indikátor pro měření napětí volím digitální LCD panelové měřidlo WPB5035. Toto měřidlo má napájecí napětí 9V, které musí být galvanicky oddělené od měřících svorek. Toho lze dosáhnout např. pomocí DC-DC měniče s izolovaným výstupem (viz kap. 10.2). Má nízkou vlastní spotřebu 10mA (změřeno) a jeho vstupní odpor je větší než 1MΩ [35]. Rozsah měřených napětí je do 1,999mV [35].

8.4 Výpočet součástek

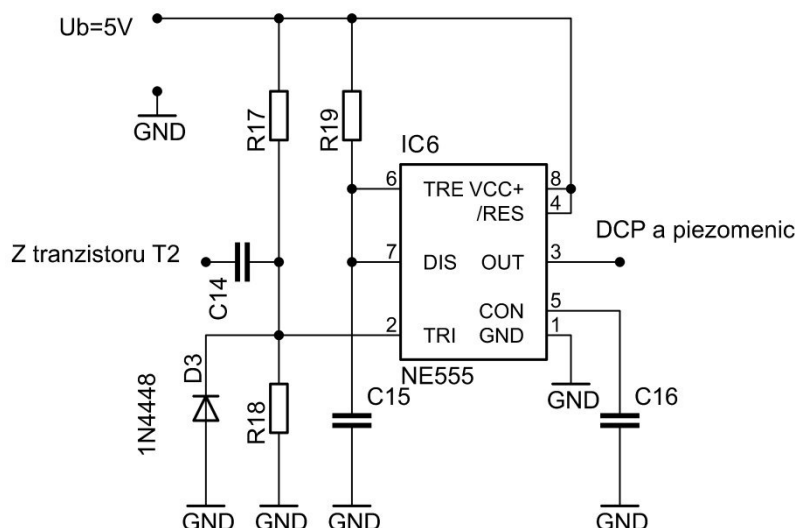
Rezistor R16

Rezistor R16 určuje maximální proud tranzistoru Q1. Tento proud volím 0,1mA (tato hodnota kolektorového proudu pro daný účel dostačuje). Pro výpočet odporu rezistoru R16 platí:

$$R16 = \frac{U_b - U_{kse}}{I_k} = \frac{5 - 8 \cdot 10^{-2}}{10^{-4}} = 49,2k\Omega, \quad (8.1)$$

kde U_b je napájecí napětí (5V), U_{kse} je úbytek napětí mezi kolektorem a emitorem sepnutého tranzistoru T2 (~80mV) a I_k je kolektorový proud [42]. Nejblíže hodnota v řadě je 47kΩ. Tím se sice nepatrně zvýší zvolená hodnota kolektorového proudu, ale to v tomto případě nehraje žádnou roli.

Monostabilní klopný obvod NE555 (viz obr. 8-4)



Obr. 8-4 Monostabilní klopný obvod s časovačem 555

Výpočet R17 a R18

Proto, aby časovač pracoval jako monostabilní klopný obvod, je nutné zajistit velikost napětí na pinu 2 (vstup komparátoru nízké úrovně) větší než je $1/3$ napájecího napětí časovače. Zvolím si, že napětí na vstupu komparátoru nízké úrovně bude v tomto případě rovno $1/2$ napětí zdroje. Tím se zvýší odolnost obvodu proti spouštění nežádoucím rušením. Proud děličem by měl být větší, než proud protékající do vstupu komparátoru nízké úrovně, aby dělič nebyl zatížený. U časovače NE555 má tento proud hodnotu $0,5\mu A$ [45]. Volím proud děličem např. o dva řády vyšší, tj. $50\mu A$. Celkový odpor děliče se vypočítá podle vztahu:

$$R_{17} + R_{18} = \frac{U_b}{I_{del}} = \frac{5}{5 \cdot 10^{-5}} = 100k\Omega, \quad (8.2)$$

kde U_b je napájecí napětí 5V a I_{del} je proud procházející děličem. Napětí na pinu 2 proti zemi bude 2,5V ($1/2$ napětí zdroje). Protože polovina z vypočítané hodnoty $100k\Omega$ je $50k\Omega$ volím z existující řady $R_{17}=R_{18}=47k\Omega$. Tím se sice proud děličem nepatrně zvýší, ale předchozí podmínka je splněna ještě lépe.

Výpočet R19 a C15

Doba trvání výstupního impulsu t_i se vypočítá podle vztahu [45]:

$$t_i = 1,1 \cdot R_{19} \cdot C_{15}. \quad (8.3)$$

Pozadí GM trubice STS-5 je průměrně 27,6 impulsů za minutu. Průměrný počet impulsů za minutu u testovacího vzorku je roven 1060 [34]. Jako testovací vzorek bylo použito stroncium, které slouží pro kalibraci měřičů. Tento průměrný počet přibližně odpovídá 17Hz, předpokládám však, že tato GM trubice bude reagovat i na vyšší úroveň záření, proto počítám s kmitočtem $f=1kHz$. Při volbě $C_{15}=10nF$ a $t_i = 1/2T$ pro výpočet rezistoru R19 podle vztahu (8.3) platí:

$$R_{19} = \frac{t_i}{1,1 \cdot C_{15}} = \frac{\frac{1}{2 \cdot 10^3}}{1,1 \cdot 10^{-8}} = 45,45k\Omega.$$

Tuto hodnotu zaokrouhlím podle existující řady na $47k\Omega$. Toto zaokrouhlení nevádí, protože doba trvání impulsu to změní jen nepatrně a funkce obvodu se nezmění.

Výpočet C14

Na vazebním kondenzátoru C14 vznikají záporné impulsy, které sníží napětí vstupující do časovače na pinu 2 pod $1/3$ napájecího napětí, které je důležité pro spuštění

monostabilního klopného obvodu. Doba trvání spouštěcího impulsu časovače musí být kratší, než doba trvání výstupního impulsu. Z tohoto důvodu pro časovou konstantu τ platí (vzato z praxe):

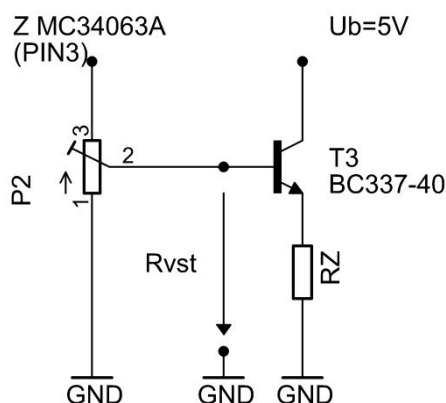
$$\tau = C_{14} \frac{R_{17} \cdot R_{18}}{R_{17} + R_{18}} \leq \frac{1}{10} t_i. \quad (8.4)$$

Hodnota kapacity kondenzátoru C14 dle vztahu (8.4) je tedy rovna:

$$C_{14} = \frac{\frac{1}{10} t_i}{\frac{1}{2} R_{17}} = \frac{5 \cdot 10^{-5}}{23,5 \cdot 10^3} = 2nF.$$

Zde vybírám z keramických kondenzátorů v existující řadě. Jeví se jako vhodný 2,2nF. Vypočtená hodnota je pouze doporučená, skutečná hodnota je závislá na tvaru impulsu, který přes tento vazební kondenzátor prochází a funkčnost je nutné ověřit (ověřeno).

Výpočet P2 v proudovém zesilovači (viz obr. 8-5)



Obr. 8-5 Proudový zesilovač

Pomocí trimru P2 je možné pevně nastavit hlasitost piezoměniče, jehož maximální proudová spotřeba je 10mA při napájecím napětí 10V [43]. Jeho zatěžovací odpor RZ (odpor piezoměniče) je roven:

$$RZ = \frac{U_{piez}}{I_{piez}} = \frac{10}{10 \cdot 10^{-3}} = 1k\Omega, \quad (8.5)$$

kde U_{piez} je velikost napětí přiložené na piezoměnič a I_{piez} je proud piezoměničem. Pro vstupní odpor emitorového sledovače R_{vst} platí:

$$R_{vst} = h_{11E} + h_{FE} \cdot RZ, \quad (8.6)$$

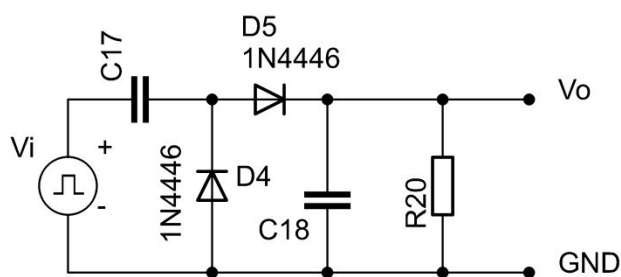
kde h_{11E} je vstupní odpor tranzistoru a h_{FE} je proudový zesilovací činitel pro zapojení se společným emitorem. Podle katalogového listu volím tranzistor T3 BC337-40, který má typickou hodnotu zesilovacího činitele rovnou 400 [42]. Hodnota vstupního odporu zvoleného tranzistoru je $1k\Omega$ (viz katalogový list). Dle vztahu (8.6) je emitorový vstupní odpor sledovače R_{vst} roven:

$$R_{vst} = 10^3 + 400 \cdot 10^3 = 401k\Omega.$$

Aby bylo možné zanedbat zátěž, kterou odporový trimr tvoří pro výstup z monostabilního klopného obvodu, volím P2 pětkrát větší než je hodnota R20 (viz dále), což je $50k\Omega$. Tato hodnota v řadě vyráběných trimrů existuje.

Obvod diodové nábojové pumpy (DCP)

Pomocí DCP je možno získat na výstupu napětí úměrné počtu po sobě jdoucích impulzů, tedy intenzitě ionizujícího záření. DCP řízený sledem obdélníkových impulzů jedné polaritě funguje na základě přenosu náboje mezi obvodovými komponenty, které jsou znázorněny na obr. 8-6.



Obr. 8-6 Schéma zapojení DCP

V intervalu, kdy se přivádí impuls, kondenzátorem C17 prochází náboj, který je následně rozdělen mezi kondenzátor C18 a rezistor R20. Na konci impulsu se C17 vybíjí přes diodu D4 a jelikož dioda D5 je v tomto intervalu uzavřena, C18 se vybíjí přes R20. Tento cyklus se stále opakuje a je závislý na opakovací frekvenci impulzů. Pokud je opakovací frekvence dostatečně vysoká, tak přes R20 bude protékat neustále proud, protože C18 se na konci každého cyklu nevybíjí úplně.

Změna výstupního napětí ΔVo je přibližně rovna [46]:

$$\Delta Vo \approx \frac{Vo \cdot T}{2 \cdot R20 \cdot C18}, \quad (8.7)$$

kde T je perioda vstupních impulzů a Vo je výstupní napětí DCP. Musí být splněna podmínka, že [46]:

$$R20 \cdot C18 \gg \frac{1}{2} \cdot T \quad (8.8)$$

Proto, aby byl zajištěn lineární vztah mezi výstupním napětím V_o a frekvencí vstupních impulzů f , musí být také splněna podmínka, že [46]:

$$C17 \cdot f \cdot R20 \ll 1, \quad (8.9)$$

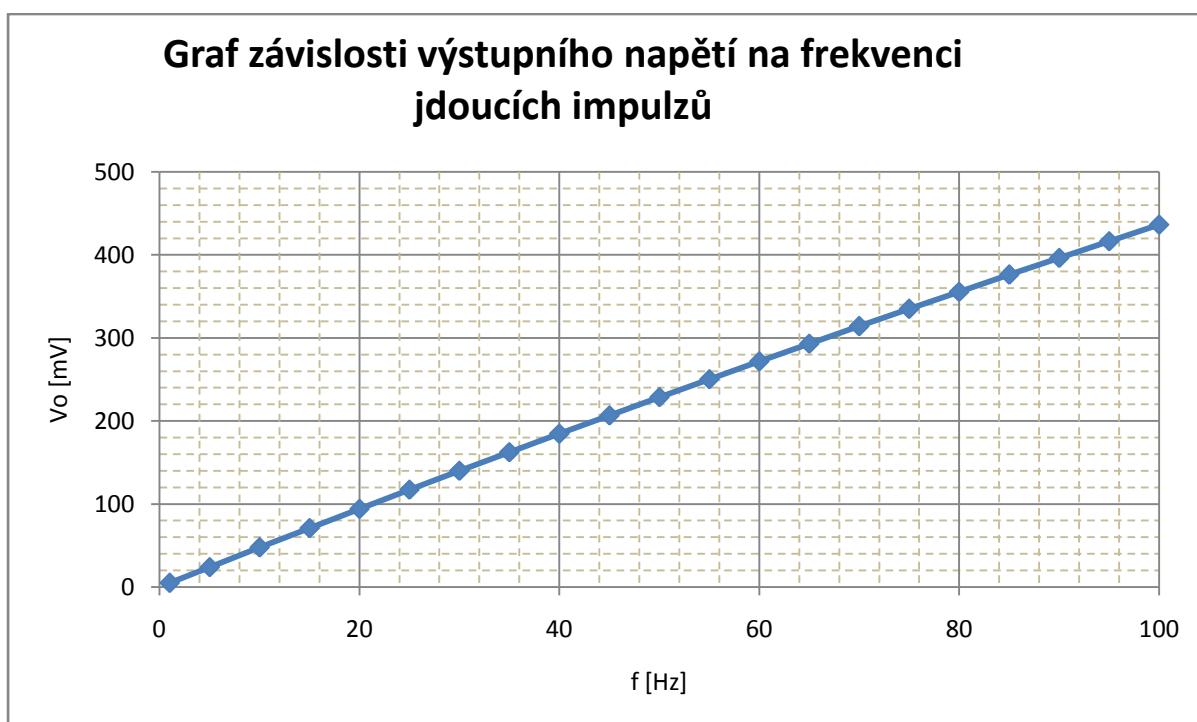
Výstupní napětí V_o je rovno [46]:

$$V_o = V_i \cdot \frac{C17 \cdot f \cdot R20}{C17 \cdot f \cdot R20 + 1}, \quad (8.10)$$

kde V_i je výška vstupních impulzů.

Při volbě $C17=0,1\mu\text{F}$, $C18=10\mu\text{F}$ a $R20=10\text{k}\Omega$ jsou uvedené podmínky splněny pro kmitočty vyšší než 10Hz. Přesto i pro nižší kmitočty než 10Hz zůstává tato závislost téměř lineární (viz Graf 1). Výška vstupních impulzů je rovna 4,8V (změřeno při napájecím napětí 5V).

Graf 1

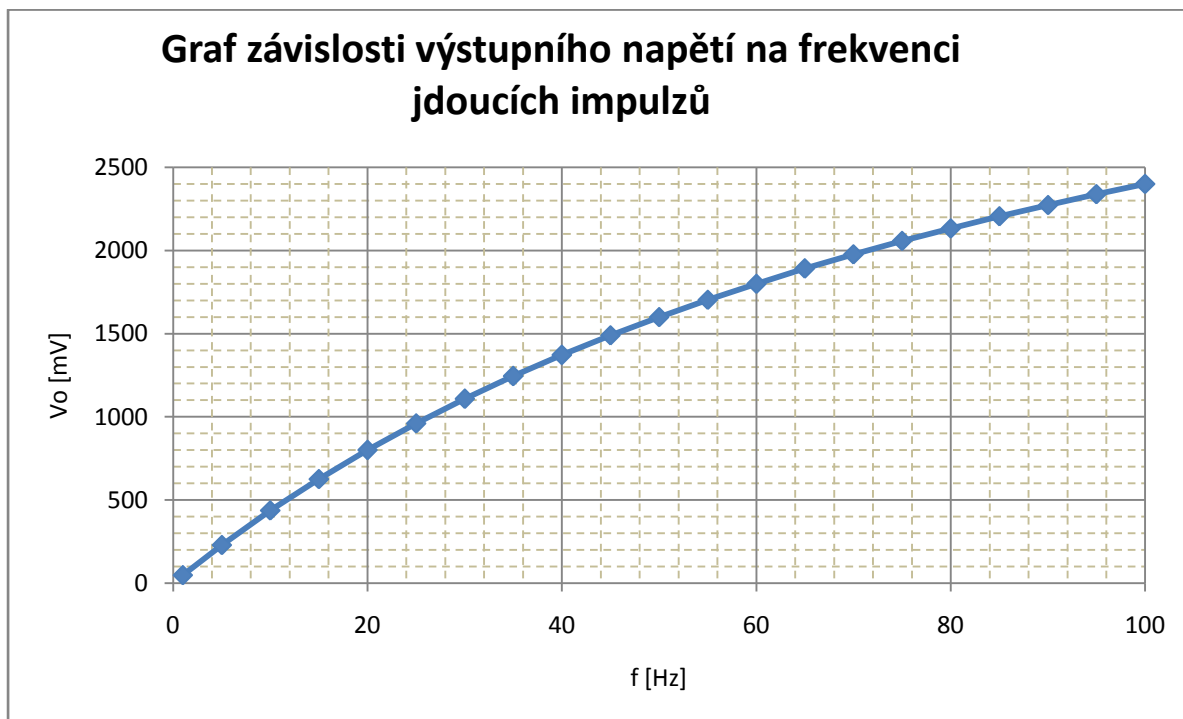


Ukázka výpočtu výstupního napětí V_o při $f=10\text{Hz}$ podle rovnice (8.10)

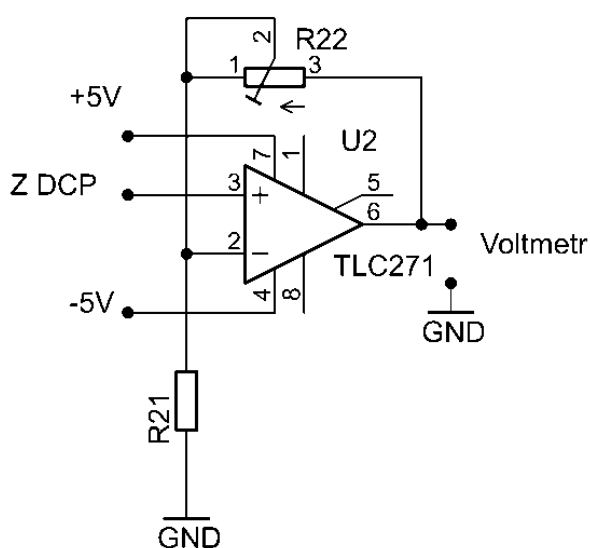
$$V_o = V_i \cdot \frac{C17 \cdot f \cdot R20}{C17 \cdot f \cdot R20 + 1} = 4,8 \cdot \frac{1 \cdot 10^{-7} \cdot 10 \cdot 1 \cdot 10^4}{1 \cdot 10^{-7} \cdot 10 \cdot 1 \cdot 10^4 + 1} = 47,5\text{mV}$$

Také musí platit podmínka, že dávkovací kondenzátor C17 musí mít daleko menší hodnotu kapacity než kondenzátor C18. Pokud by tato podmínka splněna nebyla, tak například při hodnotě kapacity kondenzátoru C17=1 μ F by neplatila lineární závislost mezi frekvencí vstupních impulsů f a výstupním napětím V_o . Nelineární závislost lze zkontrolovat na následujícím grafu (Graf 2). [46]

Graf 2



Výpočet R21 a R22 (viz obr. 8-7)



Obr. 8-7 Schéma OZ TLC271

Pro zesílení A operačního zesilovače platí:

$$A = 1 + \frac{R_{22}}{R_{21}}. \quad (8.11)$$

Při výstupních impulzech o kmitočtu $f = 100\text{Hz}$ z monostabilního klopného obvodu bude výstupní napětí napěťového zdvojovače rovno 436 mV (odečteno z Graf 1). Když si zvolím, že při tomto napětí bude na indikátoru 1V , zesilovač musí mít zesílení rovno $2,29$. Při volbě rezistoru R_{21} s odporem $75\text{k}\Omega$ pro výpočet R_{22} dle vztahu (8.11) platí:

$$R_{22} = A \cdot R_{21} - R_{21} = (2,29 \cdot 75 \cdot 10^3) - 75 \cdot 10^3 = 21,75\text{k}\Omega.$$

Nejbližší hodnota, kterou je možno použít je cermetový ležatý trimr 10mm s hodnotou $25\text{k}\Omega$.

9 Odhad spotřeby proudu

Tab. 3 Energetická rozvaha

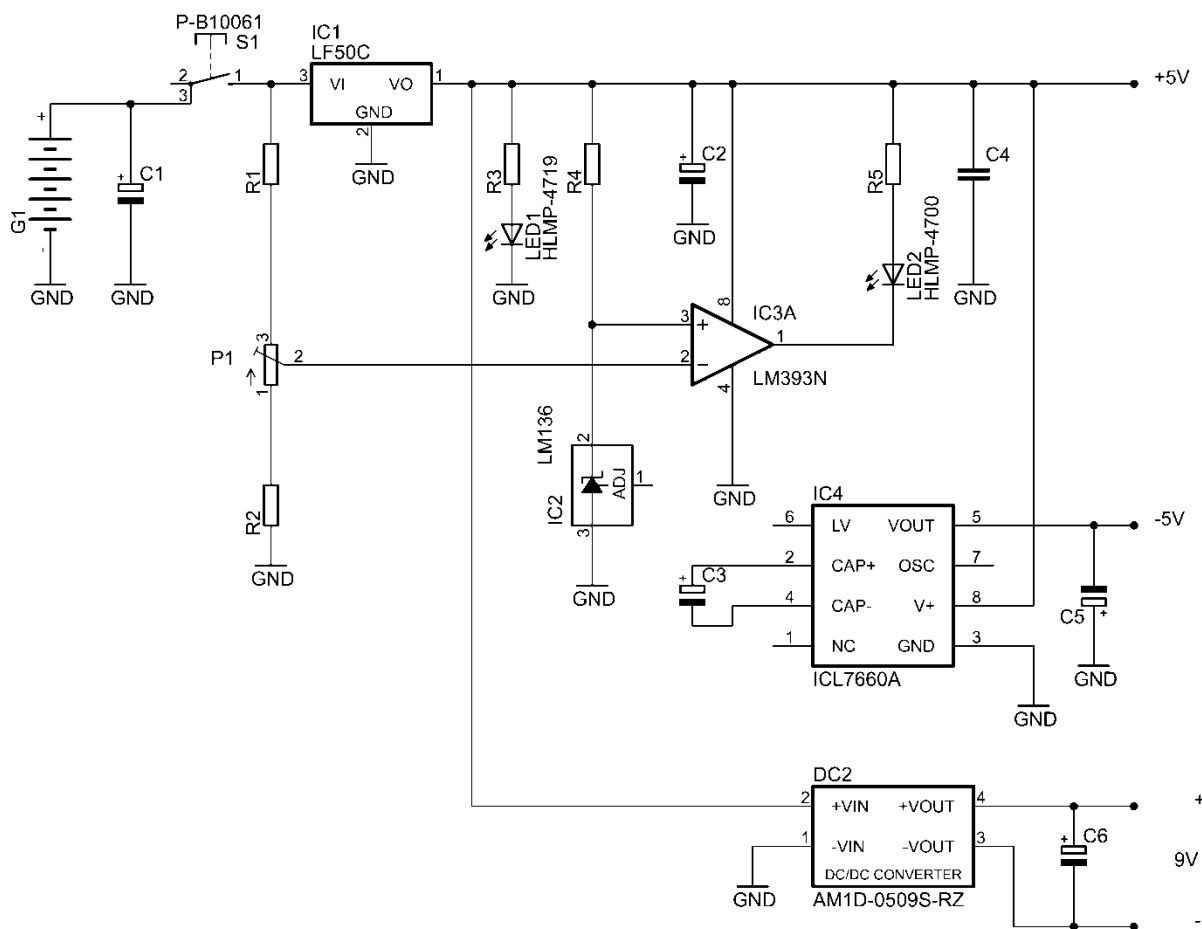
Energetická rozvaha			
Označení	Typ	I [mA]	poznámka
Napájecí zdroj			
stabilizátor	LF50C	0,5	
zdroj ref. Napětí	LM136	1,0	
signalizační LED (zapnutí)	HLMP-4719	2,0	
Komparátor	LM393N	1,0	
signalizační LED (slabá baterie)	HLMP-4700	2,0	
Nábojová pumpa	ICL7660A	0,5	
DC-DC měnič 9V	AM1D-0509S-RZ	10,0	
	Celkem	17,0	
DC-DC měnič 390V			
Řídicí obvod	MC34063A	4,0	
Spotřeba měniče (měřeno)		100,0	
	Celkem	104,0	
Vyhodnocovací obvod			
Tranzistor Q1	2N3665	0,1	
Časovač	NE555	6,0	
Op zesilovač	TLC271	0,9	zdroj +5V
Op zesilovač	TLC271	0,9	zdroj -5V
Piezoměnič	KPEG126	10,0	
	Celkem	17,9	
Měřidlo			
	WPB5035	10,0	
Rezerva			
		10,0	pouze odhad
Celková spotřeba proudu	Celkem	158,9	

10 Napájecí zdroj

Na napájecí zdroj přístroje je požadováno následující:

- Přístroj bude napájen bateriově.
- Z důvodu úbytku napětí na baterii během vybíjení je nutno napětí stabilizovat. Požadovaná hodnota napětí pro napájení celého přístroje je 5V.
- Vzhledem k tomu, že zesilovač TLC271 je napájen symetricky, je nutné vytvořit i záporné napětí -5V,
- Pro napájení indikátoru je potřebné vytvořit izolované napětí 9V.
- Přístroj indikuje vybití baterie, pokud poklesne napětí baterie pod zvolenou mez.
- Signalizuje zapnutí přístroje.
- Přístroj bude pracovat na jedno nabití alespoň 10 hodin.
- Celkový odběr proudu přístroje je 158,9mA.

10.1 Principiální popis činnosti



Obr. 10-1 Návrh schématu napájení přístroje

Na obr. 10-1 je zobrazen návrh schématu napájení přístroje. Předchozí definované podmínky jsou realizovány následovně. Na vstup napájecího zdroje je připojena baterie. Výstupní napětí stabilizátoru je 5V. Zdroj záporného napětí -5V je vytvořeno pomocí nábojové pumpy. Napětí 9V potřebné pro napájení indikátoru je vytvořeno pomocí izolovaného DC-DC měniče. LED1 signalizuje zapnutí přístroje. K indikaci vybité baterie je využito komparátoru, který porovnává hodnotu napětí získanou ze zdroje referenčního napětí s napětím na baterii. Napětí na baterii musí být vždy větší, než na výstupu stabilizátoru z důvodu úbytku napětí na stabilizátoru. Pokud napětí na baterii klesne na požadovanou mez, kdy je baterie vybitá, je na oba vstupy komparátoru přivedeno stejné napětí (2,5V), díky napěťovému děliči, a rozsvítí se signalizační LED2.

10.2 Volba součástek

Baterie

Navrhovaný přístroj bude napájen bateriovým zdrojem. Při výběru baterie je nutno zohlednit podmínku, že mezi vstupem a výstupem stabilizátoru musí být napěťový rozdíl, který je určený hodnotou úbytku napětí stabilizátoru. Volím nabíjecí baterie značky Ansmann (viz obr. 10-2). Jedná se o vysokokapacitní akumulátory NiMH s kapacitou 2100mA velikosti AA. Výhodou těchto baterií je významně potlačené samovybíjení (ztráta kapacity maximálně 20% za 6 měsíců) a zbytkovou energii jsou schopny uchovávat až 5 let, proto jsou vhodné i pro přerušované použití. Články jsou dodávány v nabitém stavu, a nepotřebují speciální nabíječku.



Obr. 10-2 Nabíjecí AA baterie značky Ansmann [51]

Bateriový zdroj se bude skládat z pěti článků již zmiňovaných baterií značky Ansmann. Pět článků volím proto, že celkové počáteční napětí bateriového zdroje je rovno 6,75V a hodnota konečného napětí je rovna 5,5V (viz nabíjecí a vybíjecí charakteristiky NiMH akumulátorů). To je dostačující, protože maximální úbytek napětí stabilizátoru je 0,35V (při proudu 200mA je střední hodnota úbytku je 0,2V) [47].

Je stanovena podmínka, že přístroj má pracovat alespoň 10 hodin. Celková spotřeba proudu přístroje je cca 160mA (viz kapitola 9). Baterie mají kapacitu 2100 mA/h, přibližná provozní doba přístroje t_p je rovna:

$$t_p = \frac{C_b}{I_{celk}} = \frac{2,1 \cdot 10^3}{160} = 13,13hod, \quad (10.1)$$

kde I_{celk} je celková spotřeba přístroje a C_b je kapacita baterie. Výsledná hodnota provozní doby přístroje 13hod je vyhovující, protože zadanou podmínku splňuje. [51]

Ostatní součástky

Poznámka - protože se jedná o zařízení s bateriovým napájením, je důležité vybírat součásti s malou vlastní spotřebou.

Pro stabilizaci napětí volím stabilizátor LF50C s nízkým úbytkem napětí v pouzdru T0220. Výstupní napětí je rovno 5V, úbytek napětí na tomto stabilizátoru je 0,35V a celý přístroj z něho může odebírat proud 500mA [47], což je víc než dostačující, protože celkový odběr proudu přístroje je přibližně 160mA (viz energetická rozvaha). Z důvodu stability stabilizátoru výrobce určuje minimální hodnotu kapacity, která je na jeho vstupu 0,1μF a výstupu 2,2μF [47]. Proto, že je vhodnější tuto minimální kapacitu ještě zvýšit z důvodu vyrovnaní kolísavé zátěže, volím elektrolytické kondenzátory C1 a C2 rovny 100μF. Oba kondenzátory jsou hliníkové, radiální. Keramický kondenzátor C4=0,1μF volím ještě navíc k blokování výstupu stabilizátoru.

Komparátor zde slouží pro hlídání stavu napětí baterie. Na jeden vstup komparátoru je připojen zdroj referenčního napětí, například LM136 v pouzdru T0-92, které dodává napětí 2,5V s hodnotou pracovního proudu 1mA (viz katalogový list). Na druhý jeho vstup je připojen potenciometr, díky němuž je možné nastavit zvolenou hodnotu při prahovém napětí na baterii. Tedy, při stavu vybité baterie (napětí 5,5V) bude na výstupu děliče napětí rovno 2,5V a komparátor sepne proud do signalizační LED2. Volím komparátor LM393 v pouzdru PDIP-8, který je napájen nesymetricky 5V s běžnou spotřebou 0,4mA [49]. Rezistor R4 má být podle doporučení výrobce referenčního zdroje napětí roven 2,5kΩ [48]. Zaokrouhlím tedy na existující hodnotu 2,4kΩ.

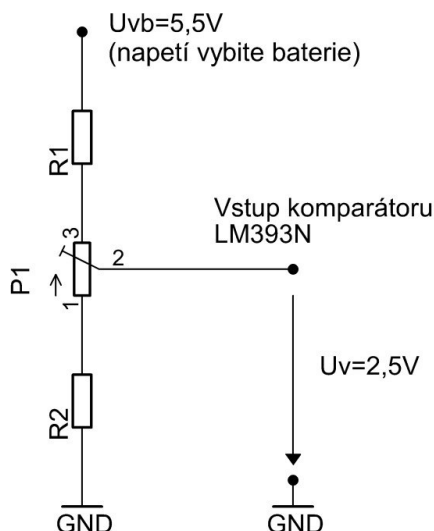
Jako signalizační LED volím typ s malým proudovým odběrem a průměrem 5mm. Tento rozměr zaručuje, že světlo LED je dobře viditelné. Jako vhodný typ se jeví např. HLMP. Její proud je 2mA [50]. Typická hodnota úbytku napětí na diodě je 1,8V. Pro indikaci vybité baterie volím barvu LED červenou (HLMP-4700) a pro signálku zapnutí barvu LED žlutou (HLMP-4719).

Nábojová pumpa ICL7660A se dá využít pro vytvoření záporného napětí pro malé odběry proudu (do 5mA – viz zatěžovací charakteristika obvodu). C3 je elektrolytický kondenzátor, která má hodnotu 10μF (podle doporučení výrobce [55]), C5 je elektrolytický kondenzátor. Jeho hodnotu volím 100μF (pro potlačení rušení na výstupu měniče (vyzkoušená hodnota).

Izolovaný DC-DC měnič AM1D-0509S-RZ je obvod, který pro svoji činnost nepotřebuje žádné externí součástky. Na jeho výstup je vhodné připojit elektrolytický kondenzátor. Zde je to C6. Jeho hodnotu volím 100μF.

10.3 Výpočet součástek

Napěťový dělič pro indikaci vybité baterie (viz obr. 10-3)

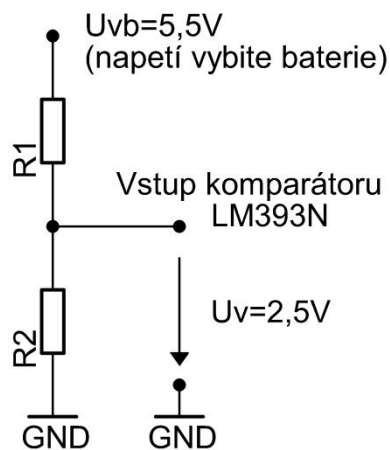


Obr. 10-3 Schéma napěťového děliče (součást indikace vybité baterie)

Když bude baterie vybitá, tedy bude mít napětí rovno 5,5V, na výstupu napěťového děliče bude 2,5V. Hodnota 2,5V vychází z hodnoty velikosti referenčního napětí na jednom ze vstupů komparátoru. K výpočtu děliče, který je tvořen rezistory R1, R2 a potenciometrem P1, si nejprve zvolím příčný proud děličem 0,1mA. To je dostačující, protože vstupní svodový proud komparátoru je 50nA [49]. Celkový proud děličem R_d se vypočítá podle vztahu:

$$R_d = \frac{U_{vb}}{I_d} = \frac{5,5}{10^{-4}} = 55k\Omega, \quad (10.2)$$

kde U_{vb} je napětí vybité baterie a I_d je proud procházející děličem. Trimr tedy slouží k tomu, abychom mohli na jeho výstupu nastavit výstupní napětí 2,5V za předpokladu, že vstupní napětí tohoto děliče bude 5,5V (vybitá baterie). Podmínka, že při vstupním napětí 5,5V bude výstupní napětí děliče nastavitelné v rozmezí od 2V do 3V, je dostačující, protože je to dosti široké rozmezí k tomu, aby bylo možné kompenzovat nepřesnosti všech prvků děliče, a také umožní dostatečně přesně nastavit potřebnou hodnotu velikosti výstupního napětí. Pro první odhad hodnot děliče nahradím odporový trimr zkratem, tj. dělič bude složený pouze z rezistorů R1 a R2 (viz obr. 10-4). Jejich velikost bude vypočítána pro výstupní napětí 2,5V, kdy výstup děliče bude nezatížený (tj. bude naprázdno).



Obr. 10-4 Schéma děliče (nahrazení trimru zkratem)

Za těchto předpokladů je možné napsat:

$$U_v = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{vb}, \quad (10.3)$$

kde U_v je potřebné výstupní napětí na děliči (2,5V). Platí však, že součet rezistorů R_1 a R_2 je roven 55kΩ. Dle vztahu (10.3) je odpor rezistoru R_2 roven:

$$R_2 = \frac{U_v}{U_{vb}} \cdot (R_1 + R_2) = \frac{2,5}{5,5} \cdot 50 \cdot 10^3 = 25k\Omega.$$

Pro R_1 můžeme tedy psát:

$$R_1 = R_d - R_2 = 50 \cdot 10^3 - 25 \cdot 10^3 = 30k\Omega. \quad (10.4)$$

Aby bylo možné se zvolenému rozsahu regulace přiblížit, je možné použít v podstatě jisté iterace. Zde je nejlepší sestavit počítací tabulku v Excelu, a zkusit kombinace existujících hodnot rezistorů a odporových trimrů.

Vypočtenou hodnotu rezistoru R_2 snížím na 20kΩ (tato hodnota v řadě rezistorů pro zatížení do 0,4W existuje) a hodnotu rezistoru R_1 na 24 kΩ. Hodnotu potenciometru P_1 volím 10 kΩ (existuje v řadě uhlíkových ležatých odporových trimrů s průměrem 10mm).

Nyní bude pro tento případ vypočítán rozsah regulace napětí na výstupu děliče za dříve vysloveného předpokladu, že výstup bude naprázdno. Krajiní hodnoty regulovaného napětí se vypočítají tak, že když bude běžec trimru P_1 v horní poloze, přičte se jeho celá hodnota k hodnotě rezistoru R_2 a když bude běžec trimru P_1 v dolní poloze, přičte se jeho celá hodnota k hodnotě rezistoru R_1 . Po výpočtu těchto dvou případů, kdy budou vypočteny hodnoty výstupního napětí, zkontroluji, zda předpokládaným podmínkám vyhovují. Pokud tomu tak nebude, bude nutno hodnoty v děliči upravit.

Pro první případ (běžec trimru je v horní poloze) platí:

$$R1 = 24k\Omega,$$

$$R'2 = R2 + P1 = 20 \cdot 10^3 + 10^4 = 30k\Omega, \quad (10.5)$$

kde $R'2$ je součet rezistoru R2 a trimru P1. Výstupní napětí U_{v1} podle vztahu (10.3) je rovno:

$$U_{v1} = \frac{R'2}{R1 + R'2} \cdot U_{vb} = \frac{30 \cdot 10^3}{24 \cdot 10^3 + 30 \cdot 10^3} \cdot 5,5 = 3,06V$$

Pro druhý případ (běžec trimru je v dolní poloze) platí:

$$R2 = 20k\Omega,$$

$$R'1 = R1 + P1 = 24 \cdot 10^3 + 10^4 = 34k\Omega, \quad (10.6)$$

kde $R'1$ je součet rezistoru R1 a trimru P1. Dle vztahu (10.3) je výstupní napětí U_{v2} rovno:

$$U_{v2} = \frac{R2}{R'1 + R2} \cdot U_{vb} = \frac{20 \cdot 10^3}{34 \cdot 10^3 + 20 \cdot 10^3} \cdot 5,5 = 2,04V$$

Děličem bude protékat proud:

$$I_d = \frac{U_{vb}}{R_d} \quad (10.7)$$

$$I_d = \frac{U_{vb}}{R1 + P1 + R2} = \frac{5,5}{24 \cdot 10^3 + 10^4 + 20 \cdot 10^3} = 0,101852mA.$$

Zvolený proud děličem se změnil jen zcela nevýznamně, regulaci výstupu je možno považovat za vyhovující, s tolerancí součástek (s ohledem na rozsah regulace) není problém. Dělič napětí je sestaven ze součástek, jejichž hodnoty v řadě existují.

Výpočet R3

Rezistor R3 určuje proud procházející LED1, která signalizuje zapnutí přístroje. Pro výpočet tohoto rezistoru platí:

$$R3 = \frac{U_b - U_{LED}}{I_{LED}} = \frac{5 - 1,8}{2 \cdot 10^{-3}} = 1,6k\Omega, \quad (10.8)$$

kde U_{LED} je úbytek napětí na LED a I_{LED} je odebíraný proud LED (hodnoty jsou vzaty z katalogového listu). Vypočítaná hodnota $R3=1,6k\Omega$ existuje, proto lze použít.

Výpočet R5

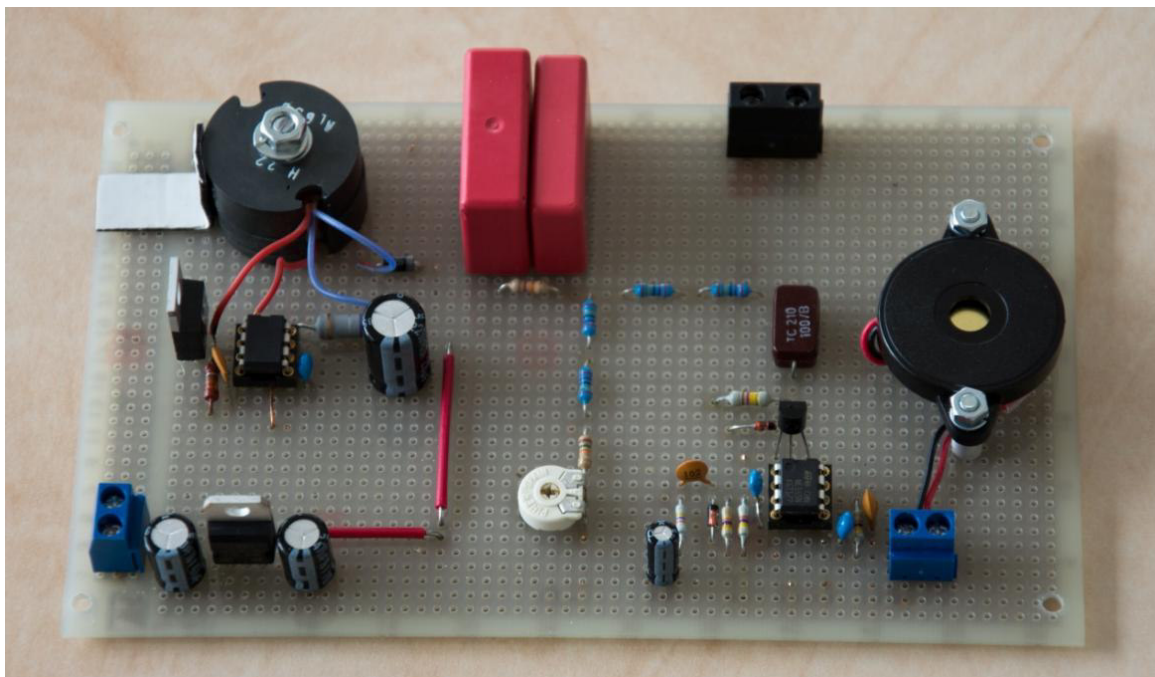
Rezistor R5 určuje proud procházející LED2, která signalizuje vybitou baterii. Pro výpočet R5 platí:

$$R5 = \frac{U_b - U_{LED} - U_{kes}}{I_{LED}} = \frac{5 - 1,8 - 8 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 10^{-3}} = 1,56k\Omega, \quad (10.9)$$

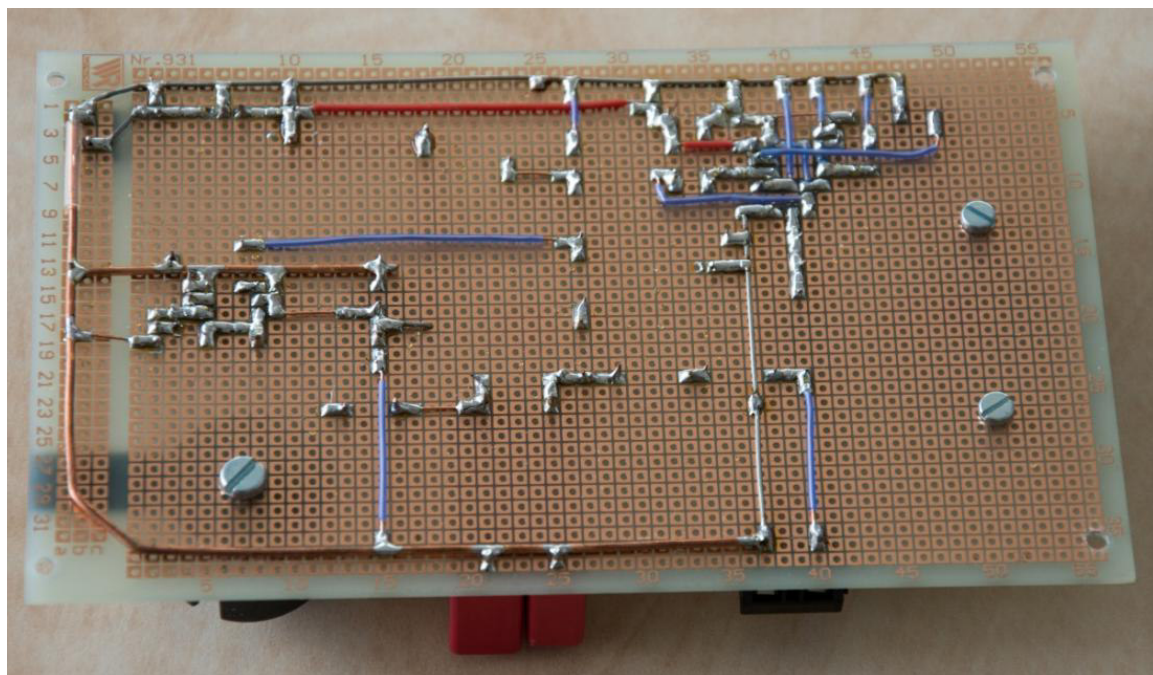
kde U_{kes} je saturační napětí spínacího tranzistoru komparátoru, která je rovna 80mV (při proudu do 10mA). V tomto případě lze saturační napětí zanedbat a velikost rezistoru R5 zvolím také 1,6kΩ. [44]

11 Realizace

Podle doporučení vedoucího práce byl u realizovaného vzorku použit zjednodušený napájecí zdroj bez hlídání stavu baterie. Zařízení bylo postaveno ve zjednodušené podobě v souladu se zadáním bakalářské práce na univerzální plošný spoj (viz obr. 11-1 a obr. 11-2), bylo oživeno a je plně funkční.



Obr. 11-1 Realizace zařízení (pohled shora)



Obr. 11-2 Realizace zařízení (pohled zdola)

Bylo prokázáno, že všechny hodnoty součástek byly vypočteny správně a ani s impulzovým transformátorem nebyly žádné problémy. Napětí pro GM trubici se dalo nastavit na předepsanou hodnotu a i ostatní části fungovaly bez závad. Pro kalibraci byl použit testovací vzorek stroncia. Některé průběhy napětí na vzorku změřené jsou součástí této bakalářské práce.

Pro vlastní zařízení byly k dispozici dva typy GM trubice. GM trubice J302 zakoupená přes firmu Conrad (viz obr. 11-3) však neměla příliš dobré vlastnosti.



Obr. 11-3 GM trubice J302

Jako daleko lepší se ukázala GM trubice STS-5 z radiometru, která byla dříve vyráběna firmou Tesla Liberec (viz obr. 11-4). Shodou okolností měly obě trubice stejné doporučené provozní napětí. U druhé trubice bylo výhodné, že byla uzavřena v ochranném obalu. Odpadlo tak riziko jejího poškození a také nehrozil dotek s napájecím napětí 390V.



Obr. 11-4 GM trubice STS-5 v ochranném obalu

12 Závěr

Cílem teoretické části této bakalářské práce bylo prostudovat problematiku související s radioaktivním zářením. V první části této práce je popsána problematika radioaktivity, stručně jsou popsány druhy ionizujícího záření a jejich vliv na biologickou tkáň. Třetí kapitola je věnována principům detekce ionizujícího záření. Ty jsou pak dále rozebrány podrobněji. Čtvrtá kapitola pojednává o detektorech pevné fáze. Pátá kapitola podrobně popisuje plynem plněné detektory. Podrobnější popis plynem plněných detektorů souvisí s následným návrhem dozimetru s GM trubicí.

Cílem praktické části bakalářské práce je návrh indikátoru záření s GM trubicí. V šesté kapitole je navrhnuté možné řešení blokového schématu detektoru záření s využitím GM trubice, kde jsou popsány dílčí bloky s ohledem na jejich požadované vlastnosti. Toto blokové schéma vychází z vlastností GM trubice STS-5, která byla pro tuto bakalářskou práci použita.

V následujících kapitolách je popisován návrh indikátoru záření s GM trubicí. Tento návrh je rozdělen na čtyři části. První část popisuje návrh DC-DC měniče pro vytvoření 390V, které je potřebné pro správnou funkci GM trubice. Druhá část je zaměřena na vyhodnocovací část přístroje. Následující část je věnována odhadu spotřeby proudu přístroje. Poslední část pojednává o napájení navrhnutého přístroje.

Na základě předchozího návrhu se podařilo realizovat indikační část přístroje, která byla testována pomocí testovacího vzorku stroncia, který slouží pro kalibraci měřičů.

Použitá literatura

- [1] Ochrana proti účinkům ionizujícího záření. *Techmania Science Center* [online]. [cit. 2015-12-27]. Dostupné z: http://www.techmania.cz/data/fil_4719.pdf
- [2] HÁLA, Jiří. *Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie*. 1. vyd. Brno: Konvoj, 1998, 310 s. ISBN 80-856-1556-8.
- [3] ULLMANN, Vojtěch. *Ullmann V.: "AstroNuklFyzika" - jaderná fyzika, astrofyzika, kosmologie, filosofie* [online]. [cit. 2015-11-11]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz>
- [4] CHMELARŠ, Milan. *Využití ionizujícího záření v lékařské diagnostice* [online]. [cit. 2015-11-17].
- [5] *Radiobiologie*. [online]. [cit. 2015-11-20]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org>
- [6] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006 [cit. 2015-11-29]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com>
- [7] HU, Bin. Optically stimulated luminescence (OSL) and its applications in radiation therapy dosimetry. *Research Online: University of Wollongong* [online]. 2010 [cit. 2015-11-15]. Dostupné z: <http://ro.uow.edu.au/theses/3181>
- [8] ROSINA, Jozef, Hana KOLÁŘOVÁ a Jiří STANEK. *Biofyzika pro studenty zdravotnických oborů*. Vyd. 1. Praha: Grada, 2006, 230 s. ISBN 80-247-1383-7.
- [9] NAVRÁTIL, Leoš a Jozef ROSINA. *Medicínská biofyzika*. Vyd. 1. Praha: Grada, 2005, 524 s. ISBN 80-247-1152-4.
- [10] Charakteristika a mrtvá doba Geiger-Müllerova počítače. *Pedagogická fakulta Jihočeské univerzity* [online]. 21. 12. 2015 [cit. 2015-11-15]. Dostupné z: <http://www.pf.jcu.cz/stru/katedry/fyzika/laborky/atom/1/uloha1.html>
- [11] KRYŠTOF, Vladimír, Josef PECINA a Oldřich OTT. *Fyzikální podklady radioterapie*. 1. vyd. Brno: Ústav pro další vzdělávání středních zdravotnických pracovníků, 1981, 84 s.
- [12] Proportional Counters. *ORAU* [online]. ©2015 [cit. 2015-11-15]. Dostupné z: <https://www.ornl.gov/ptp/collection/proportional%20counters/introprops.htm>
- [13] Chapter 3 Gas Filled Detectors. *Faculty of Science* [online]. © 1996 [cit. 2015-11-15]. Dostupné z: https://www.science.mcmaster.ca/medphys/images/files/courses/4R06/4R6Notes3_GasFilled_Detectors.pdf

- [14] Senzory ionizujícího záření. *Katedra měření: České vysoké učení technické v Praze - Fakulta elektrotechnická* [online]. [cit. 2015-12-30]. Dostupné z: http://measure.feld.cvut.cz/cs/system/files/files/cs/vyuka/predmety/x38ssd/10_Senzory_ionizujcho_zareni.pdf
- [15] Introduction to Geiger Counters. *Cal Poly Pomona* [online]. ©2015 [cit. 2015-11-15]. Dostupné z: <https://www.cpp.edu/~pbsiegel/bio431/texnotes/chapter4.pdf>
- [16] Fonox. In: *JD a VD* [online]. [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://www.jdvd.cz/files/fonox.pdf>
- [17] World Journal of Nuclear Science and Technology: *External and Environmental Radiation Dosimetry with Optically Stimulated Luminescent Detection Device Developed at the SCK•CEN* [online]. 2012 [cit. 2015-11-30]. ISSN 2161-6809. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.4236/wjnst.2012.21002>
- [18] Film Badges. *NDT Resource Center* [online]. 2001 [cit. 2015-11-29]. Dostupné z: https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/RadiationSafety/radiation_safety_equipment/film_badges.htm
- [19] Chapter 7 Semiconductor Detectors. *Faculty of Science* [online]. ©1996 [cit. 2015-11-17]. Dostupné z: <https://www.science.mcmaster.ca/medphys/images/files/courses/4R06/note7.pdf>
- [20] Dozimetrie. *VF - Osobní dozimetrie* [online]. 1992 [cit. 2015-12-27]. Dostupné z: <http://www.dozimetrie.cz/dozimetrie>
- [21] ČSN 01 1308. *Veličiny a jednotky v atomové a jaderné fyzice*. Praha: ÚNM, 1986.
- [22] MITTASCH, Marek. *Geiger-Müllerův počítač v jaderném praktiku*. České Budějovice, 2008. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Pedagogická fakulta. Vedoucí práce RNDr. Pavel Kříž, Ph.D.
- [23] HRAZDIRA, Ivo a Vojtěch MORNSTEIN. *Lékařská biofyzika a přístrojová technika*. 1. vyd. Brno: Neptun, 2001, 381 s. ISBN 80-902-8961-4.
- [24] MAREČEK, Aleš a Jaroslav HONZA. *Chemie pro čtyřletá gymnázia*. 3., opr. vyd. Olomouc: Nakladatelství Olomouc, 1998, 240 s. ISBN 80-718-2055-5.
- [25] Types of Ionizing Radiation: Alpha, Beta, Gamma, X-Ray and Neutron Radiation. *Mirion Technologies* [online]. [cit. 2015-11-29]. Dostupné z: <https://www.mirion.com/introduction-to-radiation-safety/types-of-ionizing-radiation/>

- [26] Sievert, becquerel, rentgen....Jak měříme radioaktivitu. *ATOM INFO* [online]. 2012 [cit. 2016-01-01]. Dostupné z: <http://atominfo.cz/2012/05/sievert-becquerel-rentgen-jak-merime-radioaktivitu/>
- [27] SÚKUPOVÁ, Lucie. Jaké existují „dávky“ v radiodiagnostice? *Lucie Sůkupová* [online]. ©2011-2015 [cit. 2015-12-30]. Dostupné z: <http://www.sukupova.cz/jake-existuji-davky-v-radiodiagnostice/>
- [28] Biologické účinky ionizujícího záření. *Státní ústav radiační ochrany, v.v.i.* [online]. ©2000-2015 [cit. 2015-12-30]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/radiacni-ochrana/biologicke-ucinky-ionizujiciho-zareni>
- [29] OTT, Oldřich. *VUT BMT přednáška č. 1* [online]. 2013 [cit. 2015-11-15].
- [30] OTT, Oldřich. *VUT BMT přednáška č. 3* [online]. 2013 [cit. 2015-11-15].
- [31] OTT, Oldřich. *VUT BMT přednáška č. 4* [online]. 2013 [cit. 2015-11-15].
- [32] Prstový dozimetr TLD. *VF - Osobní dozimetrie* [online]. 1992 [cit. 2015-11-31]. Dostupné z: <http://www.dozimetrie.cz/data/files/b-70-a0004c-110511-dozimetr-tld-55.pdf>
- [33] Celotělový osobní dozimetr OSL. *VF - Osobní dozimetrie* [online]. 1992 [cit. 2015-11-31]. Dostupné z: <http://www.dozimetrie.cz/data/files/b-70-a0003c-110511-dozimetr-osl-54.pdf>
- [34] GM. NEPŘEHLÉDNĚTE [online]. 2002 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://danyk.cz/gm.html>
- [35] Data sheet LCD digitálního displeje WPB5035. *GM elektronik* [online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/722/464/digitalni-panelovy-voltmetr-wpb5035-dv-1-999v-datasheet-1.pdf>
- [36] Data sheet izolačních DC-DC měničů AM1D-RZ. *Aimtec* [online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.aimtec.com/site/Aimtec/files/Datasheet/HighResolution/AM1D-RZ.pdf?ft4=15-101>
- [37] Data sheet integrovaného obvodu MC34063A. *GM electronic* [online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/330/104/mc34063ap1-datasheet-1.pdf>
- [38] Application of the MC34063 Switching Regulator. *Texas Instruments* [online]. [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slva252b/slva252b.pdf>

- [39] Aplikační poznámky AN920/D. *ON Semiconductor* [online]. [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/AN920-D.PDF
- [40] Data sheet tranzistoru IRLZ34N. *GM electronic* [online]. [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/213/181/irlz34n-datasheet-1.pdf>
- [41] Data sheet diody RL207. *GM electronic* [online]. [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/221/067/dioda-rl207-datasheet-1.pdf>
- [42] Data sheet tranzistoru BC337. In: *DatasheetCatalog.com* [online]. [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/GeneralSemiconductor/mXtwuqt.pdf>
- [43] Data sheet piezoměniče KPE126. In: *RS* [online]. [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/068e/0900766b8068ebdb.pdf>
- [44] CHMELARĚ, Milan. *Řešené příklady pro numerická cvičení z předmětu Diagnostika bio a ekosystémů*. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. ISBN 978-80-214-4361-7.
- [45] Data sheet NE555. *GM electronic* [online]. [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/312/003/ne555-datasheet-1.pdf>
- [46] Diode Charge Pump AM-FM Demodulators. *Circuit Exchange International* [online]. [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: http://www.zen22142.zen.co.uk/Theory/diode_pump/diode_pump.htm
- [47] Data sheet stabilizátoru LF50C. *GM electronic* [online]. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/330/142/lf50cv-datasheet-2.pdf>
- [48] Data sheet zdroje referenčního napětí LM136. *Texas Instruments* [online]. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/lm336-2.5-n.pdf>
- [49] Data sheet komparátoru LM393-N. *Texas Instruments* [online]. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm193-n.pdf>
- [50] Data sheet LED HLMP. *GM electronic* [online]. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/511/036/l-hlmp-4719-datasheet-2.pdf>
- [51] Ansmann maxE Mignon NiMH 4xAA 2100mAh nabíjecí baterie. Fulgur Battman [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <https://eshop.fulgurbattman.cz/produkt/baterie-akumulatory/baterie-akumulatory/baterie-nabijeci/baterie-nabijeci-ni-mh/baterie-nabijeci-aa/ansmann-maxe-mignon-nimh-4xaa-2100mah-nabijeci-baterie-4533.htm#popis>

- [52] Section 5: Inductor and Flyback Transformer Design. In: *Texas Instruments* [online]. 2001 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ml/slup127/slup127.pdf>
- [53] Section 4: Power Transformer Design. In: *Texas Instruments* [online]. 2001 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ml/slup126/slup126.pdf>
- [54] Section 1: Introduction and Basic Magnetics. In: *Texas Instruments* [online]. 2001 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ml/slup123/slup123.pdf>
- [55] Data sheet nábojové pumpy ICL7660A. *Datasheet5* [online]. [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: www.datasheet5.com/pdf-local-1502746
- [56] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje*. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-860-5691-0.

Seznam symbolů a zkratek

Symbol/Zkratka	Název	Jednotka
A	Aktivita	Bq
α	Alfa	-
P 10	Argon-methanová směs	-
β	Beta	-
D	Dávka	Gy
H	Dávkový ekvivalent	Sv
$\dot{D}$	Dávkový příkon	$\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1}$
DNA	Deoxyribonukleová kyselina	-
H _E	Efektivní dávkový ekvivalent	Sv
X	Expozice	$\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$
$\dot{X}$	Expoziční příkon	$\text{A} \cdot \text{kg}^{-1}$
γ	Gama	-
GM	Geiger-Müllerův	-
OH·	Hydroxylový radikál	-
LED	Light Emiting Diode (svítivá dioda)	-
LCD	Liquid crystal Display (displej z tekutých krystalů)	-
U	Napětí	V
NiMH	Nikl Metal Hydrid	-
R	Odpor	Ω
OSL	Optically stimulated luminescence (opticky stimulovaná luminescence)	-
H ₂ O ₂	Peroxid vodíku	-
I	Proud	A
$\dot{H}$	Příkon dávkového ekvivalentu	$\text{Sv} \cdot \text{s}^{-1}$

RTG	Rentgenovo	-
Symbol/Zkratka	Název	Jednotka
DC-DC	Stejnoseměrný vstup, stejnosměrný výstup	-
TLD	Thermoluminescent Detector (termoluminiscenční detektor)	-
H·	Vodíkový radikál	-
DCP	diodová nábojová pumpa	-

Seznam příloh

Příloha A – Soupiska použitých součástek

Příloha A

Soupiska použitých součástek

Aktivní součástky

Tab. 1 Aktivní součástky

Označení	Typ
stabilizátor	LF50C
zdroj ref. napětí	LM136
signalizační LED (zapnutí)	HLMP-4719
Komparátor	LM393N
signalizační LED (slabá baterie)	HLMP-4700
Nábojová pumpa	ICL7660A
DC-DC měnič 9V	AM1D-0509S-RZ
Řídicí obvod	MC34063A
Časovač	NE555
Op zesilovač	TLC271
Op zesilovač	TLC271
Piezoměnič	KPEG126
Měřidlo	WPB5035
Spínač	P-B10061

Pasivní součástky

Tab. 5 Diody a LED diody

Označení	typ
D1	RL207
D2	1N4448
D3	1N4448
D4	schottkyho dioda
D5	schottkyho dioda

Tab. 6 Tranzistory

Označení	typ
T1	IRLZ34N
T2	BC337-40
T3	BC337-40

Tab. 7 Rezistory – vše metalizované

Označení	Hodnota
R1	24k Ω /0,4W
R2	20k Ω /0,4W
R3	1,6k Ω /0,4W
R4	2,4k Ω /0,4W
R5	1,6k Ω /0,4W
R6	0,24 Ω /0,4W
R7	200 Ω /0,4W
R8	82k Ω /0,25W
R9	2,7M Ω /0,6W
R10	2,7M Ω /0,6W
R11	15k Ω /0,4W
R13	2,7M Ω /0,6W
R14	2,7M Ω /0,6W
R15	120k Ω /0,4W
R16	47k Ω /0,4W
R17	47k Ω /0,4W
R18	47k Ω /0,4W
R19	47k Ω /0,4W
R20	10k Ω /0,4W
R21	75k Ω /0,4W

Tab. 8 Trimry

Označení	Hodnota
P1 - cermentový	10k Ω
R12 - cermentový ležatý	5k Ω
R22 - cermentový ležatý	100k Ω
P2 - uhlíkový ležatý	50k Ω

Tab. 9 Kondenzátory elektrolytické

Označení	Hodnota
C1	100 μ F/16V
C2	100 μ F/10V
C3	10 μ F/10V
C5	100 μ F/10V
C6	100 μ F/16V
C7	220 μ F/16V
C13	100 μ F/10V
C19	100 μ F/10V

Tab. 10 Kondenzátory

Označení	Hodnota
C4 - keramický	0,1 μ F/50V
C8 - keramický	100nF/50V
C9 - keramický	680pF/50V
C10 - fóliový	1 μ F/630V
C11 - fóliový	0,1 μ F/630V
C12 - fóliový	100pF/630V
C14 - keramický	2,2nF/50V
C15 - keramický	10nF/50V
C16 - keramický	100nF/50V
C17 - keramický	0,1 μ F/50V
C18 - tantalový	10 μ F/10V