

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

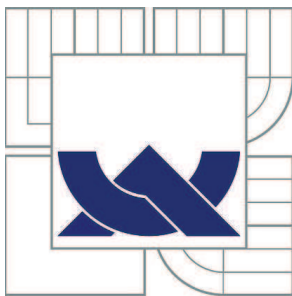
GENERÁTOR PULSŮ PRO GEORADAR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

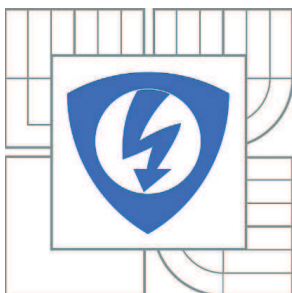
LUDEK MARTINEK

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

GENERÁTOR PULSŮ PRO GEORADAR

PULSE GENERATOR FOR GPR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

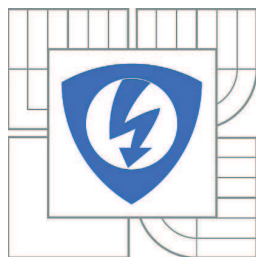
LUDĚK MARTÍNEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ ŠEBESTA, Ph.D.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Luděk Martínek

ID: 119524

Ročník: 3

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Generátor pulsů pro georadar

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Provedte systémovou studii podpovrchového georadaru se zaměřením na zpracování signálů. Navrhněte řešení generátoru pulsů širokopásmového georadaru s možností nastvení základních parametrů. Navrhněte schéma zapojení generátoru pulsů s uvažováním charakteristik vysílací antény. Navrhněte a osadte desku plošných spojů generátoru pulsů. Generátor oživte a proveďte podrobné měření charakteristik generovaných pulsů. Provedte jednoduché experimentální měření v terénu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] JOL, H. M. Ground Penetration Radars: Theory and Applications. Amsterdam: Elsevier Science, 2009.

[2] KINGSLEY, S., QUEGAN, S. Understanding Radar Systems. Raleigh: SciTech Publishing, 1999.

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 27.5.2011

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Šebesta, Ph.D.

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá problematikou podpovrchového georadaru. Nejprve se zabývá popisem elektromagnetického pole jeho matematickým popisem. Poté se zabývá měřením elektromagnetických pulsů a jejich zpracováním podpovrchovým georadarem. V práci je také popsáno zapojení generátoru pulsů v zapojení s různými tranzistory pracujícími v oblasti lavinového průrazu. Jednotlivé tranzistory jsou porovnány v časové oblasti. Z obdržených průběhů je potom vybrán nejvhodnější tranzistor pro finální generátor. Poté je navrženo řešení finálního impulsního generátoru a jeho realizace. K impulsnímu generátoru je také navržen a zkonstruován zvyšující DC-DC měnič napětí. Nakonec je provedeno měření časových průběhů na výstupu impulsního generátoru.

KLÍČOVÁ SLOVA

Georadar, generátor, impuls, lavinový tranzistor, DC-DC měnič

ABSTRACT

This thesis deals with the question of ground penetrating radar. At first it considers the electromagnetic field and its mathematical description. Then it covers measurement of electromagnetic pulses and their processing of sub-surface ground penetrating radar. In this thesis is also described the involvement of pulse generator with several transistors operating in avalanche breakdown. Individual transistors are compared in time domain. The received waveform is then selected the best transistor for the final generator. Then is proposed solution for the final pulse generator and its implementation. For impulsive generator is also designed and constructed increasing the DC-DC voltage converter. Finally, it is necessary to measure the time behavior of the output pulse generator.

KEYWORDS

Ground Penetrating Radar, generator, impulse, avalanche transistor, DC-DC converter

MARTÍNEK, L. *Generátor pulsů pro georadar*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 50 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Šebesta, PhD

Prohlášení

Jako autor bakalářské práce na téma Generátor pulsů pro georadar dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce **Doc. Ing. Jiřímu Šebestovi, Ph.D.** za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mého semestrálního projektu.

V Brně dne

.....

podpis autora

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	iii
1 ÚVOD.....	1
2 ELEKTROMAGNETICKÉ PRINCIPY GPR.....	2
2.1 Maxwellovy rovnice.....	2
2.2 Konstitutivní rovnice.....	3
2.3 Vlastnosti materiálu.....	3
2.4 Vlnová povaha elektromagnetického pole	4
2.5 Vlnové vlastnosti.....	6
2.6 Odraz, lom a přenos na rozhraních.....	7
2.7 Rozlišení.....	8
2.8 Útlum rozptylem	11
3 MĚŘENÍ SIGNÁLŮ	12
3.1 Časový rozsah a šířka pásma.....	12
3.2 Střední kmitočet	13
3.3 Získání signálu georadaru	13
3.4 Charakteristika odezvy systému.....	14
3.5 Antény	15
3.5.1 <i>Odolně zatížený dipól</i>	15
3.5.2 <i>Bionické antény</i>	16
3.5.3 <i>Rohová anténa</i>	16
4 PODMÍNKY A MEZE MĚŘENÍ.....	17
4.1 Reflexní odrazové profily.....	17
4.1.1 <i>Sběr dat</i>	17
4.1.2 <i>Operační (provozní) rozlišení</i>	17
4.1.3 <i>Velikost kroku</i>	18
4.1.4 <i>Velikost časového okénka</i>	18
4.1.5 <i>Časový interval vzorkování (vzorkovací rychlost)</i>	18
4.1.6 <i>Vzdálenost antén (přijímače a vysílače)</i>	18
4.1.7 <i>Rozmístění a rozestup linií</i>	19
4.1.8 <i>Orientace antén</i>	19
4.1.9 <i>Zprůměrování záznamu</i>	19
4.1.10 <i>Topografie</i>	20
4.2 Měření rychlosti	20
4.3 Prosvícení	21
5 ZPRACOVÁNÍ DAT A JEJICH ZOBRAZENÍ.....	22
5.1 Časový zisk	22
5.2 Korekce nulového času	23
5.3 Dekonvoluce.....	23
5.4 Filtrování	23
5.5 Odstranění pozadí.....	23
5.6 Migrace.....	24
5.7 Statická výška a konverze hloubky	24
5.8 Aplikace zesilovačů.....	24
6 INTERPRETACE GPR DAT	25
7 TVARÝ IMPULSŮ A JEJICH POPIS	25
7.1 Exponenciální a dvojexponenciální impuls.....	25

7.2	Pravoúhlý impuls.....	26
7.3	Gaussův impuls	26
8	PRINCIP GENEROVÁNÍ NAPĚŤOVÝCH IMPULSŮ.....	28
8.1	Lavinový tranzistor	28
8.2	Časové průběhy generátoru s různými tranzistory:.....	30
8.3	Zvyšující DC-DC měnič.....	33
9	REALIZACE ZVYŠUJÍCÍHO DC-DC MĚNIČE.....	34
10	REALIZACE IMPULSNÍHO GENERÁTORU	35
11	ZÁVĚR.....	40
12	LITERATURA	41
	SEZNAM VELIČIN, SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	42
	OBSAH PŘÍLOHY.....	43

SEZNAM OBRÁZKŮ

OBR.2. 1: ELEKTRICKÉ POLE E, MAGNETICKÉ POLE B A K JSOU ORTOGONÁLNÍ SMĚROVÉ VEKTORY[1].....	5
OBR.2. 2: V NÍZKOZTRÁTOVÉM PROSTŘEDÍ, EM SE ŠÍŘÍ KONEČNOU RYCHLOSTÍ A VELIKOST AMPLITUDY KLESÁ S MINIMÁLNÍ ZMĚNOU TVARU.[1].....	6
OBR.2. 3: ROZDÍLY V RYCHLOSTI A ÚTLUMU V JEDNODUCHÝCH MATERIÁLECH SE SELEKTIVNÍMI FYZIKÁLNÍMI VLASTNOSTMI. C A Z_0 JSOU RYCHLOST A IMPEDANCE VE VAKUU.[1]	6
OBR.2. 4: ODRAZ A LOM VLNY V PŘÍČNĚ ELEKTRICKÉM POLI(TE) A V PŘÍČNĚ MAGNETICKÉ POLI(TM).[1].....	8
OBR.2. 5: ROZLIŠENÍ GEORADARU (GPR) SE DĚLÍ NA DVĚ ČÁSTI, A TO NA PODÉLNÉ (RANGE) ROZLIŠENÍ A POSTRANNÍ (LATERAL OR ANGULAR) ROZLIŠENÍ.[1].....	9
OBR.2. 6: ČASOVÉ PULSY S POLOVIČNÍ ŠÍŘKOU W.[1].....	9
OBR.2. 7: SIGNÁLY Z GEORADARU JSOU ROZPTÝLENY HETEROGENNÍMI VLASTNOSTMI MATERIÁLU A ZESLABUJÍ TAK PŘENÁŠENÉ SIGNÁLY.[1].....	11
OBR.3. 1: BLOKOVÉ SCHÉMA ZNÁZORŇUJÍCÍ HLAVNÍ SLOŽKY GEORADARU. [1].....	12
OBR.3. 2: a) K MAZÁNÍ VYSÍLANÉHO SIGNÁLU DOCHÁZÍ, KDYŽ SE PŘÍMÝ SIGNÁL SMĚŘUJÍCÍ Z VYSÍLAČE K PŘÍJÍMAČI ČASOVĚ PŘEKRYJE S ODRAŽENÝM SIGNÁLEM. b) POKUD MÁME DVA CÍLE S PODOBNOU VZDÁLENOSTÍ OD SYSTÉMU, ČASOVÝ ROZDÍL OBOU ODRAŽENÝCH SIGNÁLŮ MŮŽE BÝT MALÝ A TO MŮŽE ZPŮSOBIT, ŽE SE IMPULSY PŘEKRYJÍ. JESTLIŽE CHCEME ABY SE PULSY NEPŘEKRYVALY MUSÍ SE VZDÁLENOST JEDNOHO CÍLE OD DRUHÉHO(VE VZTAHU K SYSTÉMU) LIŠIT VÍCE NEŽ O POLOVINU ŠÍŘKY PULSU VYNÁSOBENÉ RYCHLOSTÍ ŠÍŘENÍ. [1].....	13
OBR.3. 3: BLOKOVÉ SCHÉMA IDEÁLNÍHO GPR S DIGITÁLNÍM ZÁZNAMEM. [1]	14
OBR.3. 4: IMPULSNÍ ODEZVA IDEALIZOVANÉHO GEORADARU. OBÁLKA AMPLITUDY (LOG) V ZÁVISLOSTI NA ČASE. ZÁSADNÍ JE OKOLNÍ HLADINA HLUKU A3 (PŘED A PO IMPULSU), VRCHOL SIGNÁLU A1, A ZBYTKOVÁ ODEZVA SIGNÁLU SYSTÉMU A2. [1].....	14
OBR.4. 1: ILUSTRACE RŮZNÝCH ZPŮSOBŮ ORIENTACE ANTÉN	19
OBR.4. 2: METODA SBĚRU CMP DAT S POSTUPNĚ ODDALOVANÝMI ANTÉNAMI.[3].....	20
OBR.5. 1: ZPRACOVÁNÍ TOKU DAT GPR. [1]	22
OBR.5. 2: OBECNÁ POVAHA AMPLITUDY RADAROVÝCH SIGNÁLŮ V ZÁVISLOSTI NA ČASE. [1].....	23
OBR.5. 3: SNÍMKY TUNELU POŘÍZENÉ 50-MHZ GEORADAREM PŘED A PO MIGRACI. [3].....	24
OBR.7. 1: EXPONENCIÁLNÍ (VLEVO) A DVOJEXPONENCIÁLNÍ (VPRAVO) IMPULS [11].....	25
OBR.7. 2: IDEÁLNÍ A REÁLNÝ PRAVOÚHLÝ IMPULS A JEHO PARAMETRY [11].....	26
OBR.7. 3: GAUSSŮV IMPULS.....	27
OBR.7. 4: PRVNÍ (VLEVO) A DRUHÁ (VPRAVO) DERIVACE GAUSSOVA IMPULSU.....	27
OBR.8. 1: CHARAKTERISTIKY BIPOLÁRNÍHO TRANZISTORU.[3].....	28
OBR.8. 2: SCHÉMA IMPULSNÍHO GENERÁTORU S LAVINOVÝM TRANZISTOREM.....	29
OBR.8. 3: ČASOVÉ PRŮBĚHY PULSŮ GENERÁTORU.....	30
OBR.8. 4: ČASOVÉ PRŮBĚHY PULSŮ GENERÁTORU.....	31
OBR.8. 5: ČASOVÉ PRŮBĚHY PULSŮ GENERÁTORU.....	31
OBR.8. 6: ČASOVÉ PRŮBĚHY PULSŮ GENERÁTORU.....	32
OBR.8. 7: ČASOVÉ PRŮBĚHY PULSŮ GENERÁTORU.....	32
OBR.8. 8: PRINCIPIELNÍ ZAPOJENÍ ZVYŠUJÍCÍHO DC-DC MĚNIČE.[5]	33
OBR.9. 1: ZAPOJENÍ ZVYŠUJÍCÍHO DC-DC MĚNIČE.....	34
OBR.10. 1: SCHÉMA IMPULSNÍHO GENERÁTORU S MARX-BANK ARCHITEKTUROU.....	36
OBR.10. 2: ČASOVÝ PRŮBĚH PULSU GENERÁTORU.....	37
OBR.10. 3: ČASOVÝ PRŮBĚH PULSU GENERÁTORU.....	37
OBR.10. 4: ČASOVÝ PRŮBĚH PULSU GENERÁTORU.....	38
OBR.10. 5: SPEKTRUM SIGNÁLU.....	38
OBR.10. 6: FOTOGRAFIE PRACOVIŠTĚ	39

1 ÚVOD

Georadar (GPR) je přístroj, který pracuje na principu průniku a odrazu elektromagnetických rádiových vln (8 – 4000 MHz) do podpovrchových částí zemské kůry. Z vysílače (antény) na povrchu pulsují velmi vysokou frekvencí (UHF) rádiové vlny (mikrovlnění elektromagnetické energie) do zemního podloží. Vysílané mikrovlny jsou odraženy zpět k povrchu z rozhraní jednotlivých vrstev, které mají odlišné dielektrické vlastnosti. Část vysílané energie je pohlcena okolním nadzemním prostředím, další část se odrazí k povrchu, kde je zachycena druhou přijímací anténou a část energie je rozptýlena do podloží.

Rychlost radarového signálu ve vrstvách sedimentů ovlivňuje do jisté míry obsah vody. Jedním z faktorů snížení kvality rozlišení může být vysoký obsah siltu, jílu nebo slané vody v usazeninách, které způsobí zeslabení elektromagnetického signálu a omezení průniku. Ve vodivých podložích se z tohoto důvodu provádějí georadarová měření jestliže cílové vrstvy průzkumu leží v mělké hloubce pod povrchem nebo jsou kontrastní s okolním rozhraním vrstev.

Různé kombinace frekvencí antén a vysílacích modulů také ovlivňují výsledky změřených údajů v pozorované hloubce průniku, další odrazy vln a rozlišení údajů profilu. Georadar se nejlépe osvědčuje v mělkém podpovrchovém průzkumu sedimentů, stratigrafie a zobrazení podpovrchových profilů ve 2D a 3D perspektivě. Data georadaru mohou být viděna v reálném čase.

Výhodou georadaru je digitální záznam dat profilů, nedestruktivní metoda výzkumu, robustnost, mobilita.

Zemní podloží se skládá z rozličných vrstev, které mohou mít různé dielektrické vlastnosti. Rychlost průniku elektromagnetických vln prostředím závisí také na relativní permitivitě ϵ_r (dielektrické konstantě – starší název).

Rychlost průniku vln materiálem závisí nejenom na **relativní permitivitě ϵ_r** , ale také na **elektrické vodivosti σ** materiálu.

2 ELEKTROMAGNETICKÉ PRINCIPY GPR

Základy GPR leží v elektromagnetické (EM) teorii. EM pole matematicky popisují Maxwellovy rovnice. Vlastnosti materiálu popisují konstitutivní rovnice. Kombinací obou můžeme kvantitativně popisovat GPR signály [1].

2.1 Maxwellovy rovnice

EM pole můžeme matematicky vyjádřit těmito vztahy v diferenciálním tvaru:

1. Zákon celkového proudu

$$\overline{\nabla} \times \overline{H} = \overline{j} + \frac{\partial \overline{B}}{\partial t} \quad [1] \quad (2.1)$$

2. Zákon elektromagnetické indukce

$$\overline{\nabla} \times \overline{E} = -\frac{\partial \overline{B}}{\partial t} \quad [1] \quad (2.2)$$

3. Gaussův zákon elektrostatiky

$$\overline{\nabla} \times \overline{D} = \overline{q} \quad [1] \quad (2.3)$$

4. Zákon spojitosti indukčního toku

$$\overline{\nabla} \times \overline{B} = 0 \quad [1] \quad (2.4)$$

Kde :

E = intenzita elektrického pole [V/m]

H = intenzita magnetického pole [A/m]

D = elektrická indukce [C/m²]

B = magnetická indukce [T]

ρ = hustota volného náboje [C/m³]

j = hustota elektrického proudu [A/m³]

Řešením Maxwellových rovnic pro šíření v zemi vyplývá, že rozhlasové vlny jsou exponenciálně tlumené s hloubkou [1].

2.2 Konstitutivní rovnice

Konstitutivní rovnice popisují reakci materiálu na EM pole. Pro GPR jsou elektrické a magnetické vlastnosti materiálu důležité. Konstitutivní rovnice poskytují makroskopický popis toho, jak elektrony, atomy, molekuly a reagují na působení EM pole.

$$\bar{J} = \tilde{\sigma} \bar{E} \quad [1] \quad (2.5)$$

$$\bar{D} = \tilde{\epsilon} \bar{E} \quad [1] \quad (2.6)$$

$$\bar{B} = \tilde{\mu} \bar{H} \quad [1] \quad (2.7)$$

Elektrická vodivost σ charakterizuje schopnost materiálu vést elektrický proud. Permittivita ϵ popisuje vztah mezi vektory intenzity elektrického pole a elektrické indukce v materiálu nebo vakuu. Permeabilita μ je fyzikální veličina, udávající míru magnetizace v důsledku působícího magnetického pole.

Jestliže jsou fyzikální vlastnosti materiálu disperzní musíme použít komplexnější formu konstitutivní rovnice:

$$\bar{J}(t) = \int_0^{\infty} \tilde{\sigma}(\beta) \cdot \bar{E}(t - \beta) d\beta \quad [1] \quad (2.8)$$

2.3 Vlastnosti materiálu

Pro GPR jsou nejlepší minimální elektrické ztráty materiálu. Pokud bude $\sigma = 0$ signál z georadaru bude moci proniknout do velké hloubky. V praxi ale spíše převládají materiály s větší elektrickou vodivostí. Například slaná voda může podstatně zhoršit dosah signálu georadaru.

Zemi tvoří většinou směsice různých materiálů. Znalost materiálů tvořící zkoumanou oblast je pro zpracování výsledků z georadaru klíčová.

Ve frekvenčním rozsahu 10 - 1000 MHz hraje přítomnost vody v materiálu důležitou roli. Většina minerálů má obecně dobré izolační dielektrické vlastnosti. Jejich permitivita se pohybuje v rozmezí 3 - 8 a mají prakticky nulovou elektrickou vodivost.

Půda, horniny a stavební materiál mohou být "nasáknuty" vodou nebo jiným materiálem. Voda zvedá elektrickou vodivost materiálu v rozsahu 1 - 1000 mS/m. Voda je zdaleka nejvíce polarizovaný přírodní materiál (jinými slovy, má vysokou permitivitu - kolem 80).

Rychlost šíření EM vln v závislosti na fyzikálních veličinách a hloubkový dosah při zvolené anténě s frekvencí 50 a 1000 Hz (tab.1)

Materiál	Relativní permitivita, ϵ_r	Konduktivita, σ (mS/m)	Rychlost (m/ns)	Vlnová délka (m)	
				frekvence 50 Hz	frekvence 1000 Hz
Vzduch	1	0	0.30	6	0.3
Pramenná voda	81	0.5	0.033	0.66	0.033
Mořská voda	81	3000	0.01	0.2	0.01
Led	3.2	0.01	0.16	3.2	0.16
Jíl	25-40	50-100	0.5-0.6	10-12	0.5-0.6
Granit	4-6	0.01	0.1-0.12	2-2.4	0.1-0.12
Vápenec	4-8	0.5-2	0.1-0.12	2-2.4	0.1-0.12
Nenasycený písek	3-6	0.01	0.15	3	0.15
Nasycený písek	20-30	0.1-1	0.06	1.2	0.06
Břidlice	5-15	1-100	0.09	1:8	0.09
Prachovce	5-30	1-100	0.07	1.4	0.07

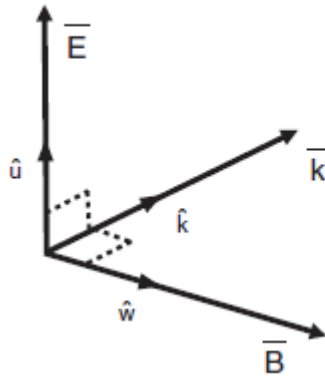
Permitivita hornin: schopnost hornin polarizovat se při vložení do elektrického pole. Tato schopnost dielektrické polarizace závisí na vytváření elektrických dipólů v původně elektricky neutrální látce. P.h. se projevuje až při velmi vysokých frekvencích (řádově MHz). Nejčastěji bývá schopnost hornin polarizovat se vyjadřována v hodnotách relativní p., což je poměr p. látky k p. prázdného prostoru – vakua. Relativní hodnoty dosahuje voda (kolem 80). Vlhké horniny mají proto vysokou p. P.h. se v geofyzice měří – metodou dielektrické karotáže.

2.4 Vlnová povaha elektromagnetického pole

Georadar využívá vlnový charakter EM polí. Maxwellovy rovnice popisují elektrické a magnetické pole v závislosti na čase. V závislosti na relativní velikosti ztrátové energie (spojené s vodivostí) a na skladování energie (spojené s permitivitou a prostupností), může být pole difúzní nebo se může šířit jako vlny [1].

Vlnový charakter se projeví, když přepíšeme Maxwellovy rovnice tak aby eliminovaly buď elektrické nebo magnetické pole. Pomocí elektrického pole, přepíšeme výnosy příčného vektoru vlnové rovnice

$$\nabla \times \nabla \times \bar{E} + \mu\sigma \cdot \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} + \mu\epsilon \cdot \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} = 0 \quad [1] \quad (2.9)$$



Obr.2. 1: Elektrické pole \vec{E} , magnetické pole \vec{B} a \vec{k} jsou ortogonální směrové vektory. \hat{u} , \hat{v} a \hat{k} jsou ortogonální jednotkové vektory. [1]

Georadar je nejúčinnější při měření materiálu s malými ztrátami, kde je pohlcování energie ve srovnání se skladováním energie zanedbatelné. Řešení příčné vlnové rovnice (1.9) je graficky znázorněno na Obr.2. 1. Elektrické a magnetické pole jsou navzájem kolmé a k nim je také kolmý prostorový vektor \vec{k} .

Takováto řešení jsou označována jako řešení pro rovinnou vlnu Maxwellovy rovnice. Díky GPR má, obvykle měřené, elektrické pole následující tvar:

$$\vec{E} = f(\vec{r} \cdot \hat{k}, t) \hat{u} \quad [1] \quad (2.10)$$

kde \vec{r} je vektor popisující umístění v prostoru a $f(\vec{r} \cdot \hat{k}, t)$ splňuje skalární rovnici

$$\frac{\partial^2}{\partial \beta^2} f(\beta, t) - \mu\sigma \frac{\partial}{\partial t} f(\beta, t) - \mu\varepsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} f(\beta, t) \equiv 0 \quad [1] \quad (2.11)$$

Kde $\beta = \vec{r} \cdot \hat{k}$ je vzdálenost ve směru \hat{k} .

Podmínka malých ztrát je

$$f(\beta, t) \approx f(\beta \pm vt) e^{\mp \alpha \beta} \quad [1] \quad (2.12)$$

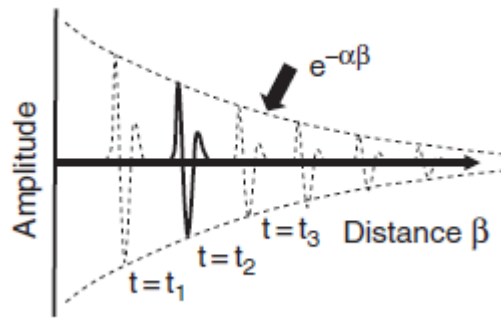
kde

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \quad \alpha = \frac{1}{2} \sigma \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (2.13)$$

jsou rychlost a útlum vlnění. V mnoha případech je sinusového buzení vyjádřeno pomocí úhlové frekvence ω v této podobě

$$f(\beta, t) = A \exp\left(-i\left(\frac{\beta}{v} - \omega t\right)\right) e^{-\alpha \beta} \quad [1] \quad (2.14)$$

kde A je maximální amplituda signálu.



Obr.2. 2: V nízko ztrátovém prostředí, EM se šíří konečnou rychlostí a velikost amplitudy klesá s minimální změnou tvaru. [1]

Sinusové signály jsou charakterizovány tím že jsou buzeny úhlovou frekvencí ω a prostorovou vlnovou délkou λ , kde $\lambda = 2\pi v / \omega$.

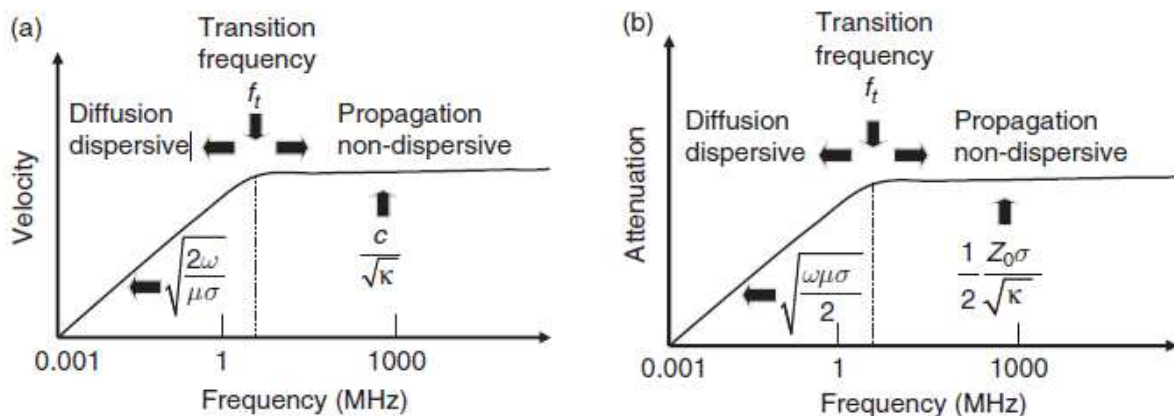
2.5 Vlnové vlastnosti

Klíčové vlastnosti vlnového pole jsou rychlost v , útlum a EM impedance Z . Vlnové vlastnosti pro jednoduché materiály se stálou permitivitou, vodivostí a permeabilitou se dají nejnázne vyjádřit pokud je časová změna sinusovky předpokládána [1].

Všechny vlnové vlastnosti vykazují podobné chování. Na nízkých frekvencích jsou vlny závislé na $\sqrt{\omega}$, což svědčí o difúzním chování pole. Při vysoké frekvenci, se vlnové vlastnosti stávají frekvenčně nezávislými (jestliže jsou ϵ , σ a μ frekvenčně nezávislé). Vysokofrekvenční chování je pro GPR nejdůležitější.

Přechodová frekvence pro jednoduchý materiál je definována takto:

$$f_t = \frac{\sigma}{2\pi\epsilon} \quad [1] \quad (2.15)$$



Obr.2. 3: Rozdíly v rychlosti a útlumu v jednoduchých materiálech se selektivními fyzikálními vlastnostmi. c a Z_0 jsou rychlost a impedance ve vakuu. [1]

Nad frekvencí f_t (Obr.2. 3) se všechny frekvenční složky šíří stejnou rychlostí a mají stejným útlum. Impuls se tak šíří neporušený a bez rozptylu. Pro tento případ můžeme rychlost, útlum, impedanci vyjádřit takto:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{c}{\sqrt{\kappa}} \quad [1] \quad (2.16)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \cdot \frac{\sigma}{2} = Z_0 \cdot \frac{\sigma}{2 \cdot \sqrt{\kappa}} \quad [1] \quad (2.17)$$

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \frac{Z_0}{\sqrt{\kappa}} \quad [1] \quad (2.18)$$

$\mu = \mu_0$ kde $\mu_0 = 1,25 \cdot 10^{-6} \text{ H / m}$ (permeabilita vakua)

c – rychlost světla ve vakuu

Z_0 – impedance ve vakuu

$$Z_0(\Omega) = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \Omega \quad [1] \quad (2.19)$$

Za normálních okolností u GPR s rostoucí frekvencí postupně roste rychlost i útlum. To způsobují dva hlavní faktory. Prvním faktorem je že voda začne se zvyšováním frekvence absorbovat čím dál více energie. Dokonce i na frekvenci 500 MHz, můžeme pozorovat ztráty způsobené vodou u jinak minimálně ztrátových materiálů [1]. Druhým faktorem jsou rozptylové ztráty které jsou frekvenčně závislé, a které se nejvíce uplatní při vysokých frekvencích.

2.6 Odraz, lom a přenos na rozhraních

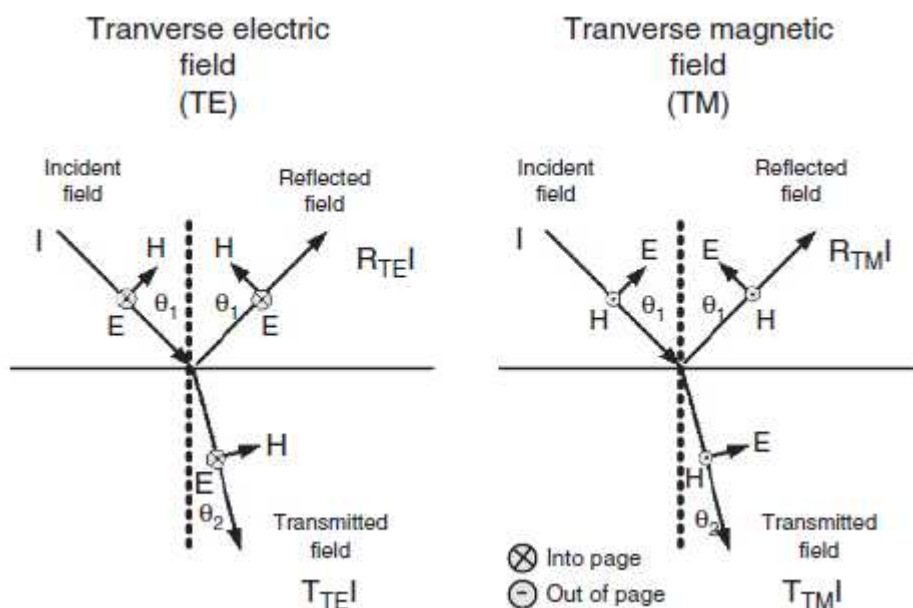
Georadarové metody obvykle závisí na detekci odraženého nebo rozptýlené signálu. Nejjednodušší model pro představu poskytuje rovinné rozhraní. Jedná-li se o dvě různá prostředí budou rychlosti a úhly (měřeno ke kolmici rozhraní) dopadající a lomené vlny různé, pak podle Snellova zákona platí:

$$\frac{\sin \theta_1}{v_1} = \frac{\sin \theta_2}{v_2} \quad (2.20)$$

Pokud je $v_1 > v_2$, tzn. že vlna se šíří z hustšího prostředí do řidšího může nastat že úhel lomu θ_2 je roven pravému úhlu (tzv. kritický úhel). Kritický úhel hraje roli v mnoha GPR. Vektor EM pole rozdělí vlny na dvě samostatné složky definované orientací pole s ohledem na hranice. Složky jsou označovány jako TE (příčné elektrické pole) a TM (příčné magnetické pole). Případ, kdy se odráží a přenáší intenzita pole popsán touto rovnicí:

$$I + R \cdot I = T \cdot I \quad [1] \quad (2.21)$$

Hodnoty R a T jsou určeny splněním Snellova zákona, musí být nepřetržité elektrické a magnetická pole na rovině rozhraní, elektrický proud a magnetická indukce přechodu musí být stejné na obou stranách rozhraní [1].



Obr.2. 4: Odraz a lom vlny v příčně elektrickém poli(TE) a v příčně magnetické poli(TM). [1]

Výsledkem je:

$$R_{TE} = \frac{Y_1 \cdot \cos \theta_1 - Y_2 \cdot \cos \theta_2}{Y_1 \cdot \cos \theta_1 + Y_2 \cdot \cos \theta_2} \quad [1] \quad (2.21)$$

$$R_{TM} = \frac{Z_1 \cdot \cos \theta_1 - Z_2 \cdot \cos \theta_2}{Z_1 \cdot \cos \theta_1 + Z_2 \cdot \cos \theta_2} \quad [1] \quad (2.22)$$

a

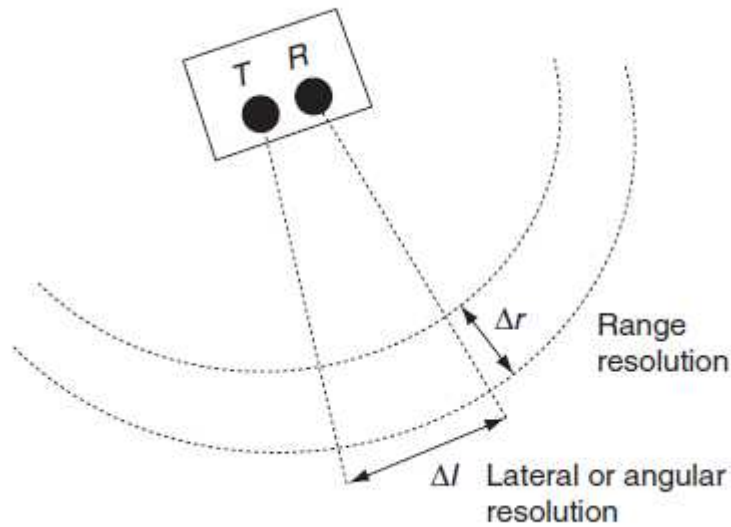
$$T_{TE} = 1 + R_{TE} \quad (2.23)$$

$$T_{TM} = 1 + R_{TM} \quad (2.24)$$

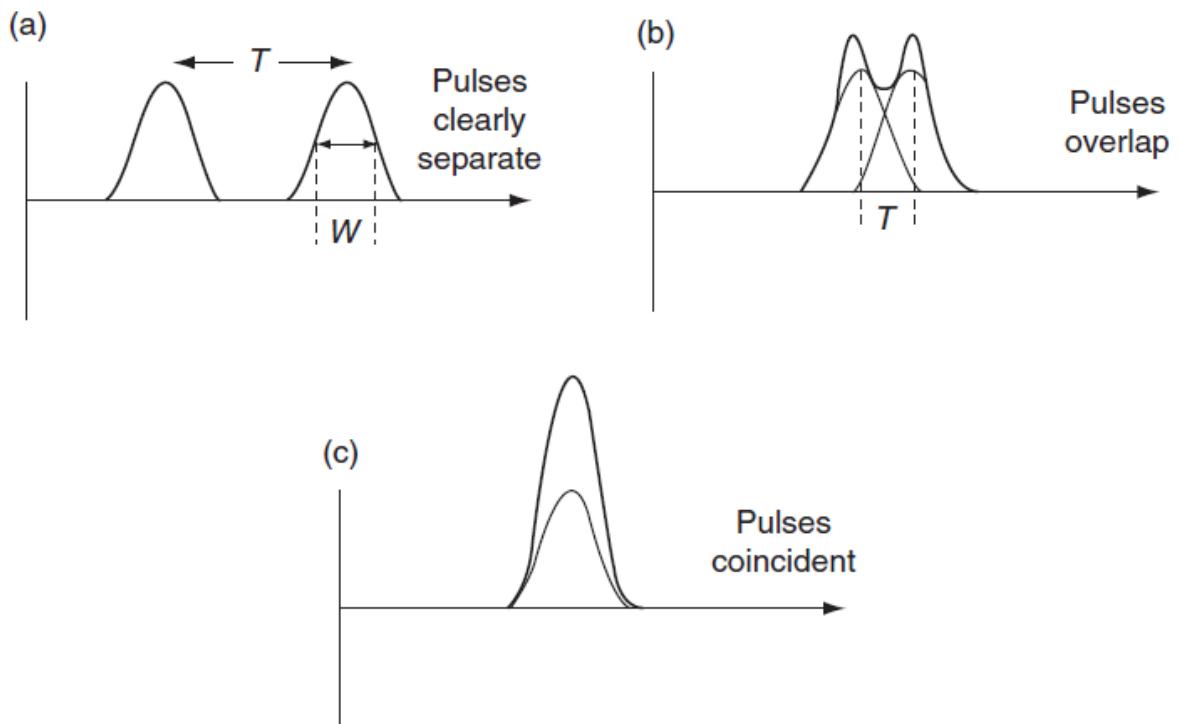
kde Y_i a Z_i jsou admitance a impedance ($Y_i = 1/Z_i$) i -tého materiálu. Když EM vlna dopadá vertikálně na rozhraní ($\theta_1 = \theta_2 = 0$), mezi TE a TM vlnou není žádný rozdíl(reflexní koeficienty TE a TM jsou stejné).

2.7 Rozlišení

Teď se budeme zabývat tím jak přesně můžeme objekt lokalizovat, a kolik informací lze získat o jeho tvaru. Rozlišovací schopnost georadaru se skládá ze dvou složek, a to podélného rozlišení (radiálního - rozsah nebo hloubka) a postranního rozlišení (úhel) jak je znázorněno na Obr.2. 5.



Obr.2. 5: Rozlišení georadaru (GPR) se dělí na dvě části, a to na podélné (range) rozlišení a postranní (lateral or angular) rozlišení. [1]



Obr.2. 6: Časové pulsy s poloviční šířkou W . (a) Pulsy jsou jasně oddělitelné (platí když $T \gg W$). (b) Oba dva pulsy jsou ještě rozeznatelné (když $T \approx W$). (c) Je-li $T \ll W$ jsou pulsy od sebe nerozlišitelné. [1]

Rozlišení je pojem, který je společný pro většinu vlnových jevů založených na metodě detekce. Na systémech, které impuls generují a následně snímají odražený signál se pojem rozlišení demonstruje nejsnázeji. Odražené signály mohou přijít do přijímače se mohou současně překrývat nebo být odděleny v čase, jak je znázorněno na Obr.2. 6.

Pokud amplituda jednoho pulsu zasahuje maximálně do poloviny šířky amplitudy druhého jsou oba pulsy od sebe rozlišitelné. Pokud jsou, ale od sebe časově odděleny o menší než je tato vzdálenost jsou pulsy od sebe nerozlišitelné a dochází ke ztrátě informace. Radiální rozlišení pulsu je vyjádřeno takto:

$$\Delta r \geq \frac{W \cdot v}{4} \quad [1] \quad (2.25)$$

Radiální rozlišení pulsu je určeno šířkou pulzu a rychlostí s jakou se puls šíří v materiálu. V ideálním případě je radiální rozlišení nezávislé na vzdálenosti od zdroje. V praxi ovlivňuje radiální rozlišení na větších vzdálenostech pulsní disperze a útlum.

Postranní rozlišení délky je následující:

$$\Delta l \geq \sqrt{\frac{vrW}{2}} \quad [1] \quad (2.26)$$

kde r je vzdálenost k cíli.

Postranní rozlišení závisí na rychlosti, šířce pulsu a na vzdálenost od systému. Čím je vysílač a přijímač dál od objektu tím větší je laterální rozlišení. Laterální rozlišení je úzce spjato s konceptem Fresnelovy zóny, která se týká interference monochromatických (sinusových) signálů [1].

S šířkou pulsu W přímo souvisí i šířka pásma B , která přímo souvisí s centrální frekvencí f_c . Jestliže použijeme vztah

$$W = \frac{1}{B} = \frac{1}{f_c} \quad (2.27)$$

a stanovíme, že střední frekvence vlnové délky je

$$\lambda_c = \frac{f_c}{v} \quad (2.28)$$

pak může být laterální rozlišení vyjádřeno jako

$$\Delta l \geq \sqrt{\frac{d\lambda_c}{2}} \quad (2.29)$$

Aby odpovědi z podloží nebyly přímkově spojeny (aliasing nebo alias-efekt), ale měly plynulý průběh křivky, nemělo by největší vertikální rozlišení překročit $\frac{1}{4}$ až $\frac{1}{2}$ vlnové délky (Nyquistův vzorkovací interval). Pokud tuto podmínku nespĺňuje, dochází k překrytí frekvenčních spekter vzorkovaného signálu a tedy ke ztrátě informace.

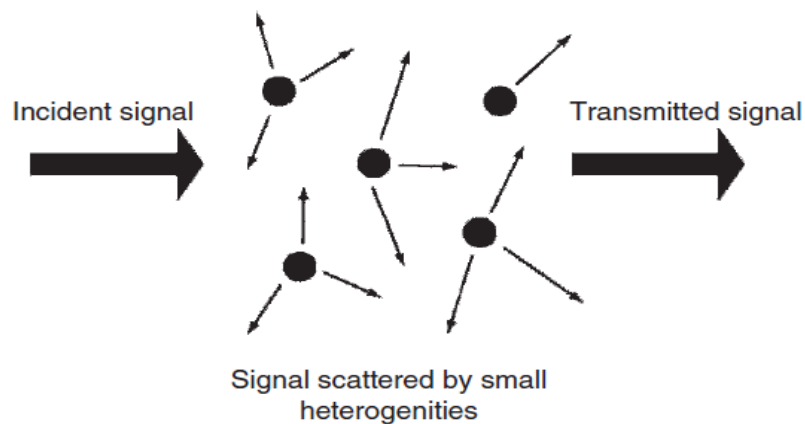
2.8 Útlum rozptylem

Signály z georadaru se vždy šíří složitým prostředím. Elektrické nebo magnetické pole se zmírní s rostoucím rozptylem útlumu α_s . Jinými slovy, elektrické pole bude klesat se vzdáleností r .

$$E = E_0 e^{-\alpha_s r} \quad [1] \quad (2.30)$$

kde

$$\lambda_s = \frac{NA}{2} \quad [1] \quad (2.31)$$



Obr.2. 7: Signály z georadaru jsou rozptýleny heterogenními vlastnostmi materiálu a zeslabují tak přenášené signály. [1]

Útlum rozptylem je velmi frekvenčně závislý. Rayleigho rozptyl pulsu, procházejícího rozptylovým místem, je vyjádřen takto:

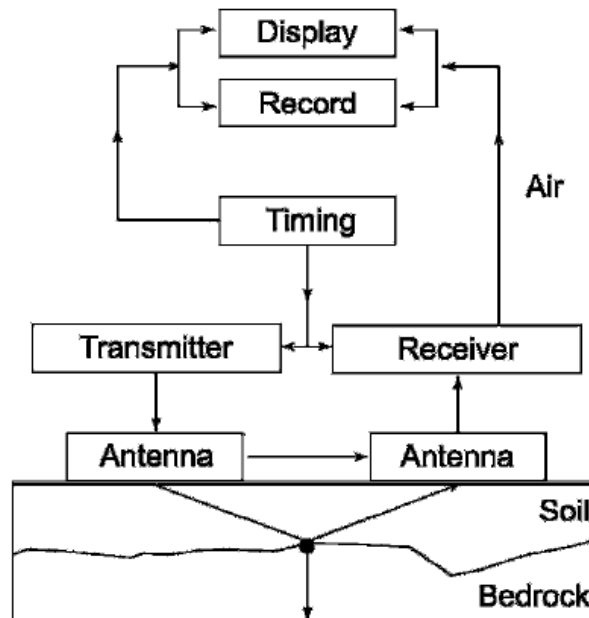
$$A = Ca^6 f^4 \quad [1] \quad (2.32)$$

kde C je konstanta s jednotkami $1/m^4 \text{ Hz}^4$, a je poloměr oblasti, a f je frekvence.

Útlum rozptylem musí být přidán k odporovému a materiálnímu útlumu pro stanovení úplného útlumu signálu GPR.

3 MĚŘENÍ SIGNÁLŮ

Georadary jsou koncepčně jednoduché. Cílem je získání amplitudy v závislosti na čase po vybuzení signálu. Srdcem systému GPR (Obr.3. 1) je časovací jednotka, která ovládá generování a detekci signálu. Většina georadarů pracuje v časové oblasti.



Obr.3. 1: Blokové schéma znázorňující hlavní složky georadaru. [1]

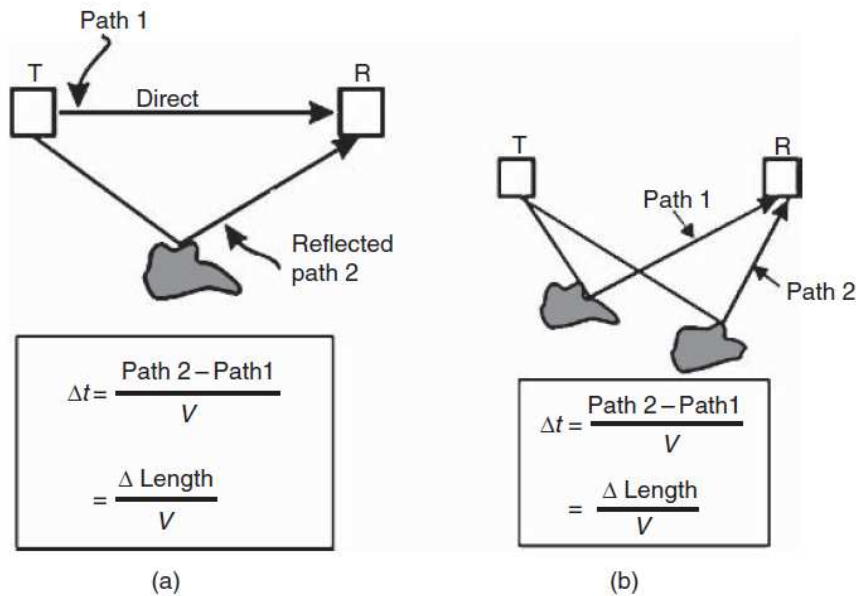
3.1 Časový rozsah a šířka pásma

Georadary obvykle potřebují pro záznam časových dat přesnost menší než 10 ps s časem trvání 10 000 ns. Měřená šířka pásma se vztahuje přímo k rozlišení.

Vysílač vysílá obvykle velmi velký signál, a pokud je přijímač v těsné blízkosti vysílače, jak je tomu obvykle u GPR, pak na přijímači uvidíme přímo vysílaný signál. Pokud je tento signál dostatečně velký, bude přijímač přetížený a nebude detekovat odražené signály. Doba trvání vysílacího impulsu se nepřímo mění se šířkou pásma [1].

Radiální rozlišení Δr určuje šířku pásma vztahem

$$B \geq \frac{v}{4\Delta r} \quad [1] \quad (3.1)$$



Obr.3. 2: a) K mazání vysílaného signálu dochází, když se přímý signál směřující z vysílače k přijímači časově překryje s odraženým signálem. b) Pokud máme dva cíle s podobnou vzdáleností od systému, časový rozdíl obou odražených signálů může být malý a to může způsobit, že se impulsy překryjí. Jestliže chceme aby se pulsy nepřekrývaly musí se vzdálenost jednoho cíle od druhého (ve vztahu k systému) lišit více než o polovinu šířky pulsu vynásobené rychlostí šíření. [1]

3.2 Střední kmitočet

Šířka pásma nedefinuje frekvenci GPR. Aby byl GPR účinný tak se frekvence udržuje co nejbližší nad transiční (přechodovou) frekvencí, protože útlum v přírodních materiálech je tvořen kombinací elektrických ztrát a ztrát způsobených rozptylem. Obě tyto ztráty se zvyšují se frekvencí rostou. Při nižší frekvenci je tím pádem větší pravděpodobnost, že signál pronikne hlouběji.

Georadarové signály jsou charakterizovány poměrem šířky pásma a střední frekvence.

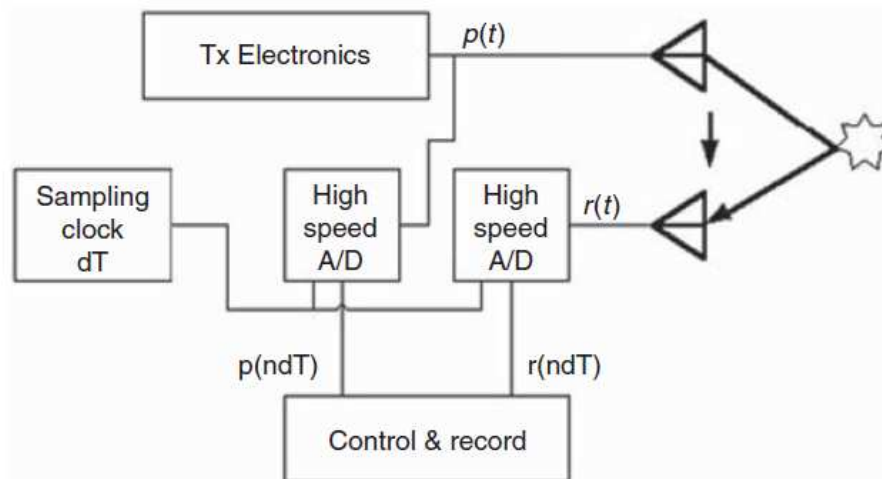
$$R = \frac{B}{f_c} \quad [1] \quad (3.2)$$

snažíme se aby R bylo co největší, tzn. zajistit co největší šířku pásma a nejnižší střední kmitočet.

3.3 Získání signálu georadaru

Ideální GPR systém je znázorněn na obrázku (Obr.3. 3). V tomto systému, vysílač dodává přes anténu elektrický signál okolí. Přijímací anténa tento signál z prostředí snímá a převádí opět na elektrický.

V tomto systému je výstupním signálem z vysílače $p(t)$ "krmena" vysílací anténa a signál přijatý přijímací anténou $r(t)$ je digitalizován rychlými A / D převodníky (vysoká vzorkovací frekvence), dále zpracován a zobrazen.

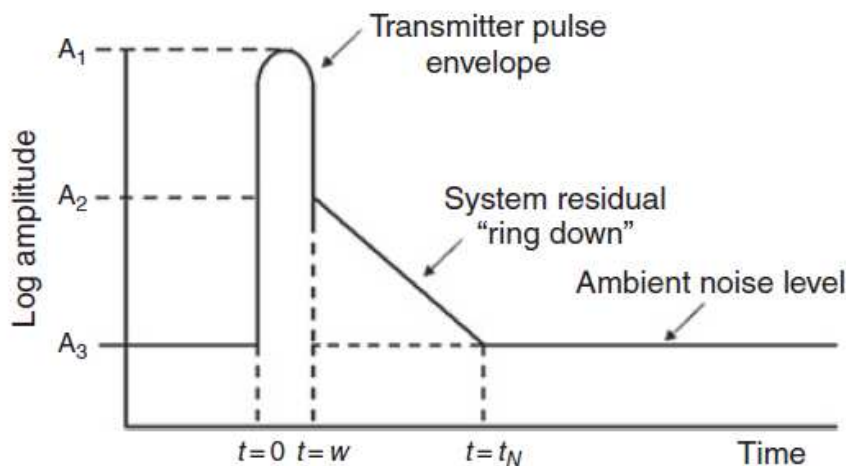


Obr.3. 3: Blokové schéma ideálního GPR s digitálním záznamem. [1]

3.4 Charakteristika odezvy systému

GPR data jsou zjednodušována na digitální amplitudy závislé na čase. Řada faktorů jako je struktura antény a podpůrné systémy způsobují deformaci měřeného signálu.

Systémy se chovají, jak je znázorněno na Obr.3. 4. Přenášený vybuzeň signál začíná v čase 0 a trvá po dobu W . V ideálním případě by po uplynutí doby W všechny signály systému vymizely.



Obr.3. 4: Impulsní odezva idealizovaného georadaru. Obálka amplitudy (Log) v závislosti na čase. Zásadní je okolní hladina hluku A_3 (před a po impulsu), vrchol signálu A_1 , a zbytková odezva signálu systému A_2 . [1]

Reálné systémy mají přechodné reakce, které přetrvávají i v době, po které by ideální signál skončil. Kromě toho jsou signály vysílány a detekovány pomocí antén. Antény vytvářejí konečné časové zpoždění v proudech, které se pohybují kolem antény. Toto konečné zpoždění je důležité pro efektivní vysílání a detekci signálu.

Kromě toho, antény musí být propojené pomocí kabelů a dalších mechanických konstrukcí. Tyto pomocné struktury mohou také nést vyvolané elektrické proudy, které pak vytvářejí pole s konečným zpožděním. Georadary vykazují samostatně generované signály

vždy po ukončení předchozího vysílacího impulsu. Po ukončení vysílacího impulsu by se zbytková odezva systému s časem měla rychle snížit a být v ideálním případě nižší než okolní hladina hluku. Zbytková odezva je často označována jako dozvuk systému.

Pokud je zbytkový signál systému větší než odražený signál, pak bude odražený signál maskován a nebude vidět [1].

Dozvuk georadaru může být charakterizován pomocí rovnice

$$A = A_3 \quad t < 0 \quad [1] \quad (3.3)$$

$$A = A_1 \quad 0 < t < W \quad [1] \quad (3.4)$$

$$A = A_2 - \delta(t - W) \quad W < t < t_n \quad [1] \quad (3.5)$$

$$A = A_3 \quad t > t_n \quad [1] \quad (3.6)$$

kde

$$t_n = \frac{A_2 - A_3}{\delta} + W \quad [1] \quad (3.7)$$

a A_1 je vrchol signálu vysílacího impulsu, A_2 je zbytková odezva amplitudy signálu v čase t , A_3 je okolní hladina hluku, δ je dozvuk (obvykle v dB / ns) a W je šířka pulzu.

3.5 Antény

Anténa u georadaru vytváří klíčové EM pole. Vysílací anténa musí přeložit budící napětí na časově a prostorově předvídatelné pole. Přijímací antény musí z elektromagnetického pole vytvořit elektrický signál.

Požadované charakteristiky antény:

- a) Odezva vysílače a přijímače musí být časově a prostorově neměnná.
- b) Šířka pásma antény musí odpovídat systémovým požadavkům.

Problémem antény je její impulsní odezva. Zatímco impulsní odezva přijímače může být změřena v laboratoři, impulsní odezva antény závisí na reakci spojené se zemí a bude se měnit se změnou výšky antény nad zemí nebo se změnou terénu [4].

Tento problém by nejlépe vyřešila širokopásmová anténa nazývaná jako frekvenčně-nezávislá anténa. Ačkoliv takováto anténa nemůže být vyrobena, známe několik druhů antén, které se snaží tuto anténu nahradit.

Antény, které byly prokazatelně nejúčinnější pro GPR jsou krátké elektrické dipóly.

3.5.1 Odolně zatížený dipól

V tradičním dipólu nastává rezonance když vysílaný proud putuje po vedení, na konci se odráží, obrací fázi, a vrací se zpět na konec ve fázi s vysílaným signálem. Této rezonance se lze vyvarovat odolným zatížením dipólu podél jeho délky tzv. odporovým zatížením konce nebo použitím radarově absorpčních materiálů podél jeho délky. V podstatě jsou tyto techniky navrženy tak, že impuls putuje po anténním drátu a zmizí [4].

Odolně zatížené dipóly se považují za nevhodnější typy antén pro georadary.

3.5.2 Bionické antény

Nekonečně dlouhá bionická anténa se chová jako perfektní přenosové vedení s reálnou impedancí. U praktických bionických antén se sice objevuje stojaté vlnění, ale šířku pásma mají lepší než konvenční dipóly a ta se zlepšuje s rostoucím úhlem kuželu. Existuje také dvourozměrná verze bionické antény, často nazývána jako motýlková anténa, ta je pro některé aplikace užitečnější než klasická bionická anténa.

3.5.3 Rohová anténa

Rohová anténa může být použita na nejvyšších frekvencích a šířka pásma může být zvětšena pečlivým návrhem tvaru, včetně vnitřních hřebenů a dielektrickým zatížením.

4 PODMÍNKY A MEZE MĚŘENÍ

Rozdělujeme do tří základních oblastí:

- reflexní odrazové profily
- měření rychlosti
- prosvícení

4.1 Reflexní odrazové profily

Zahrnují tyto důležité parametry:

- sběr dat
- operační (provozní) rozlišení
- velikost kroku
- velikost (hloubka) časového okénka
- časový interval vzorkování
- vzdálenost antén
- rozmístění a vzdálenost linií
- orientace antén
- zprůměrování záznamu
- topografie

4.1.1 Sběr dat

Při sběru dat používáme dvě základní varianty:

1. Sběr dat v krokovém režimu je velice spolehlivý. Při tomto režimu se antény posunují ve směru průzkumu v konstantních rozestupech. Zpřesnění a zjednoduší nastává, když se antény upevní na vozík (sáně). Odečet konstantních intervalů vzdálenosti se pak provede na měřicím pásmu, které se umístí ve směru trasy průzkumu. Tento způsob sběru dat dává vysoké rozlišení a vynikající kvalitu dat.

2. Sběr dat v kontinuálním režimu snižuje kvalitu dat v následném řazení a některé hodnotící kroky, jako migrace nebo topografická korekce jsou méně spolehlivé. Při této variantě se antény táhnou po povrchu, a v nerovné terénní konfiguraci může dojít ke znehodnocení dat vlivem nerovnoměrného kontaktu celé plochy antény se zemí.

4.1.2 Operační (provozní) rozlišení

Před každým georadarovým průzkumem je nutné předem zvážit hloubku průniku vlnění v závislosti s rozlišením dříve, než jsou zvoleny frekvence antény a výkon vysílače. Při výběru frekvence je nutné vzít v úvahu také rozměry zkoumaných předmětů. Nižší frekvence antény zvyšují hloubku průniku, vyšší frekvence antény pak zvyšují rozlišovací schopnost a snižují hloubku průniku (Hänninen, 1992).

Pro efektivní zobrazení podloží pomocí GPR, lze využít různé frekvence antén. Běžně užívané frekvence antén při průzkumech sedimentů se pohybují od 50 do 500 MHz, při důležitých průzkumech se užívají antény o frekvenci 100 MHz.

Frekvence antén 400 – 1000 MHz způsobují kratší vlnovou délku a pronikají do menších hloubek s vyšším rozlišením.

4.1.3 Velikost kroku

Měření probíhá podél vytyčených přímek, které nazýváme **profily**. Hustota měření profilů je vzdálenost mezi jednotlivými body trasy průzkumu (kroky).

Navrhuje se ještě před započítáním georadarového průzkumu, a ovlivňuje kvalitu měřených podpovrchových dat. Rozhodnutí zvětšit či zmenšit krok závisí na mnoha faktorech, jako jsou obrysy, plochy, úhel sklonu a účel průzkumu. Pokud je velikost kroku příliš velká, data reálně nezobrazí prudce klesající odrazné plochy (např. zlomy) a podpovrchové prostředí nehomogenit není v georadarovém profilu dobře definováno.

Při kontinuálním měření závisí hustota měřených bodů v podstatě jen na nastavení přístroje a rychlosti pohybu po profilu.

Běžná velikost kroku podpovrchového průzkumu při použití antény 100 MHz je 0,25 m. K zobrazení detailního horizontálních rozlišení sedimentárních rozhraní se používá menší velikost kroku (0,1 – 0,5 m), maximální velikost kroku je 1 m (ale i 0,1 – 0,5 m) - závisí na frekvenci antén. Kvalitní zobrazení šikmého zvrstvení v podloží závisí na velikosti kroku a na délce měření šikmého zvrstvení – má být méně než $\frac{1}{4}$. (Je třeba dodržet Nyquistův interval od $\frac{1}{4}$ do $\frac{1}{2}$ vlnové délky).

4.1.4 Velikost časového okénka

Je to soustava vertikálně orientovaných časových záznamů na přijímajícím dipólu. Velikost časového okénka by měla přesahovat cílovou hloubku asi o jednu třetinu (Annan, 2002), což často vyžaduje předběžné testování na místě. U hlubších penetrací bude hloubka časového okénka odpovídat většímu množství zaznamenaných a zpracovaných dat a tedy i delší době měření.

4.1.5 Časový interval vzorkování (vzorkovací rychlost)

Je rychlost vzorkování přijatého signálu. Vychází z vlnové délky a frekvence vysílaného signálu. Jestliže se frekvence antény zvýší, je potřeba vyšší vzorkovací rychlost. (viz. Nyquistův interval – viz. velikost kroku). Zvýší-li se časový interval vzorkování (při konstantní délce časového okénka), zvýší se čas průzkumu.

Nyquistův teorém: $f_{vz} \geq 2f_{max}$

f_{vz} vzorkovací frekvence

f_{max} maximální frekvence vzorkovaného signálu

4.1.6 Vzdálenost antén (přijímače a vysílače)

Liší se pro každou frekvenci antén. Rozlišení cíle průzkumu v hloubce se snižuje se zvětšením rozestupu antén.

Pro málo prozkoumané oblasti se doporučuje rozestup antén ve vzdálenosti přibližně 20% cílové hloubky, v praxi se často využívá malého rozestupu antén.

4.1.7 Rozmístění a rozestup linií

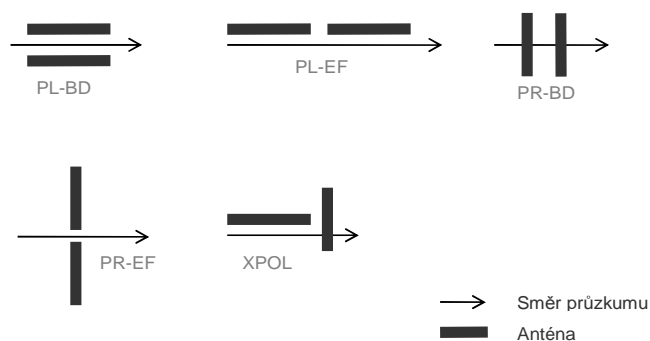
Vzdálenost mezi profily se určuje v závislosti na rozměrech očekávaného objektu. Pokud je vzdálenost mezi měřicími body příliš velká, malé obrysy a hluboké prohlubně se nezobrazí. Linie GPR výzkumu by měly být orientovány tak, aby vytvářely mřížku s liniemi běžícími rovnoběžně a kolmo k očekávaným směrům klesání sedimentu.

Očekáváme-li objekty obdélné až lineárně protažené, je třeba linie profilů orientovat přibližně kolmo na předpokládaný průběh objektů. K vytvoření 2D vizualizací je nutný celý soubor linií v mřížkách.

Mřížkové sítě se užívají zejména pro 3D vizualizace profilů, tak aby vzdálenosti přímků byly vhodné pro konstrukci 3D modelů (Beres et. al., 1995). S využitím 3D modelů může být podpovrchové sedimentární prostředí důkladně zmapováno, a jeho mocnost a vnitřní stratigrafie se zobrazí pomocí řezů.

4.1.8 Orientace antén

Volba orientace antén ovlivňuje kvalitu měřených profilů. Před započítím průzkumu je třeba si uvědomit, které antény jsou dvojpólové a mají potřebnou polarizaci. Nejvíce používaná orientace, která zaručuje pokrytí nejširšího úhlu podpovrchové odrazné plochy, je kolmo k příčnému vyzařování směru výzkumu (PR-BD). Pro lepší identifikaci podpovrchových obrysů např. hladiny podzemní vody, je vhodnější orientace rovnoběžně s příčným vyzařováním (PL-BD). Při měření se musí udržovat malá vzdálenost mezi anténami, aby se maximalizovala energie odrazu (Annan, 2002).



Obr.4. 1: Ilustrace různých způsobů orientace antén (elektrické pole se nachází podél osy antény)
PL – rovnoběžně, PR – kolmo, BD – příčné vyzařování, EF – podélné vyzařování,
XPOL – křížová polarizace (Jol a Bristow, 2003)

4.1.9 Zprůměrování záznamu

Jedná se o proces **zprůměrnování**, který se provede během sběru dat **při krokovém režimu**. Tím se potlačují nežádoucí stopy záznamu. Každá dráha GPR profilu by měla být vyplněna vertikálně (např. 32 nebo 64 krát). Tímto způsobem jsou minimalizovány náhodné signály (šum), zatímco trvalé signály (odrazy) jsou zdůrazněny (Ulriksen, 1982).

4.1.10 Topografie

Základní složkou GPR výzkumu je sběr topografických dat. Měření se provádí podél každého GPR profilu v intervalech 5 m (i méně) a u každého terénního zlomu. K měření můžeme použít různé přístroje, např. tachymetr, laserové nivelační přístroje, optické nivelační přístroje a GPS.

Laserové nivelační přístroje se účinně používají v terénech, které jsou málo členité a mají výškové změny menší než 5 m. Optické nivelační přístroje mají širokou škálu použití, nevýhodou u nich je delší doba měření.

Tachymetr se dobře využívá v členitějším terénu a má poměrně vysokou přesnost měření. GPS přijímače obtížně pracují např. pod stromy a vyžadují následné zpracování dat. Při těchto měření je nutné použít RTK jednotky.

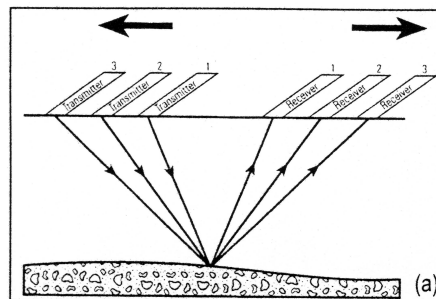
4.2 Měření rychlosti

Chceme-li převést šíření elektromagnetických impulsů pod povrchem na hloubku, musíme znát rychlost šíření elektromagnetické energie zkoumaného podloží.

Abychom se při sondování rychlosti vyhnuli nákladným a destruktivním technikám (vrty, výkopy, vibrační jádrování a karotáže výchozů) použijeme některou z těchto metod:

- **metoda CMP** – využívá společný reflexní bod, a používá se především v reflexní seismice. Metoda používá krokový režim pro určení rychlosti EM šíření především v sedimentech blízko pod povrchem. Podmínkou je horizontální poloha odrazné plochy.

Před započítáním hlavního průzkumu je potřeba v oblasti průzkumu provést několik měření CMP.



Obr.4. 2: Metoda sběru CMP dat s postupně oddalovanými anténami. [3]

Na začátku měření se pracuje s anténami v minimálním rozestupu a dále se antény oddalují po 5 nebo 10 cm, dokud je signál možné zaznamenat, úhel dopadu nepřesáhne 45 – 60°. Pozemní vlny se používají k výpočtu rychlosti průniku sedimenty, CMP dávají dobrý odhad rychlosti a poskytuje i další informace o zkoumané lokalitě.

CMP sondování je přesnější, protože antény jsou vždy centrovány kolem stejného bodu, přičemž el. pole antén jsou paralelní a antény jsou oddalovány podél linie průzkumu kolmé k polarizaci el. pole nad horizontální odraznou plochou.

- **metoda WARR** využívá širokouhlé reflexe a refrakce. Jejím principem je pevně fixovaná anténa (zdroj) a přijímací anténa se pohybuje od vysílače.
- **výpočet z lineárních a hyperbolických refrakčních vzorů**
- **rozpoznání odrazových ploch ve známé hloubce v profilu** (např. přiřazením odrazů k vrstvám ve vrtech).
- **užitím experimentů s výřezy**
- **tomografie křížových vrtů**

4.3 Prosvícení

K zobrazení vnitřních anomálií a defektů (např. u hráze přehrad, výztuže sloupů a opěrných stěn, archeologických památek) se používá průzkum systémem prosvícení. Principem této metody jsou vysílací a přijímací antény, které se připevní na příslušné konstrukci proti sobě tak, aby došlo k průniku signálu z vysílací antény skrz konstrukci do přijímací antény (metoda COP).

Jestliže je pro výzkum potřeba přesnější zobrazení nehomogenit v konstrukci, používá se metody MOG.

Tato metoda křížově zobrazí prosvícené konstrukce a provádí se systémem vícenásobného vyhodnocení měření. Vysílací a přijímací antény jsou postupně umísťovány proti sobě na různá místa a pod různými úhly. Pomocí metody MOG jsou zobrazeny průzkumy ve 2D zobrazení včetně rychlosti, útlumu a rozptylu.

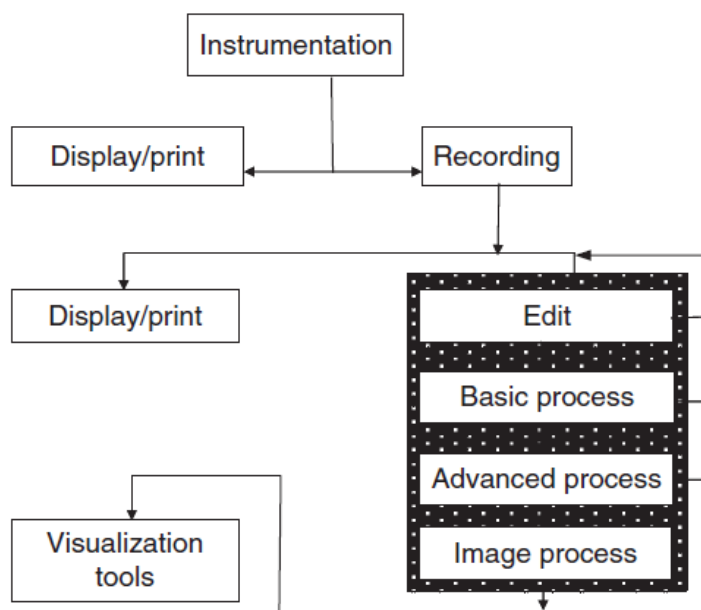
Pro přesné zobrazení metodou prosvícení je nutné správně umístit zdrojové přijímací antény zvláště u silně vyztužených sloupů anebo nerovnoměrných soch.

5 ZPRACOVÁNÍ DAT A JEJICH ZOBRAZENÍ

Veškerá data vyžadují zpracování, jehož cílem je zaostření signální křivky zlepšením poměru signálu a šumu (Reynold).

Výstupem po zpracování je průřez podpovrchových elektrických vlastností, který se zobrazuje pomocí obousměrného času šíření. Je to čas, který vlně zabere pohyb od vysílače k odrazné ploše a návrat k přijímači.

Typické zpracování toku dat GPR je znázorněno na obrázku (Obr.5. 1). Zpracování dat se zaměřuje na zvýrazněné oblasti: editaci dat, základní zpracování, pokročilé zpracování a vizualizaci a interpretaci. Zpracování je obvykle opakující se činnost; data budou proudit zpracovávanou smyčce několikrát.

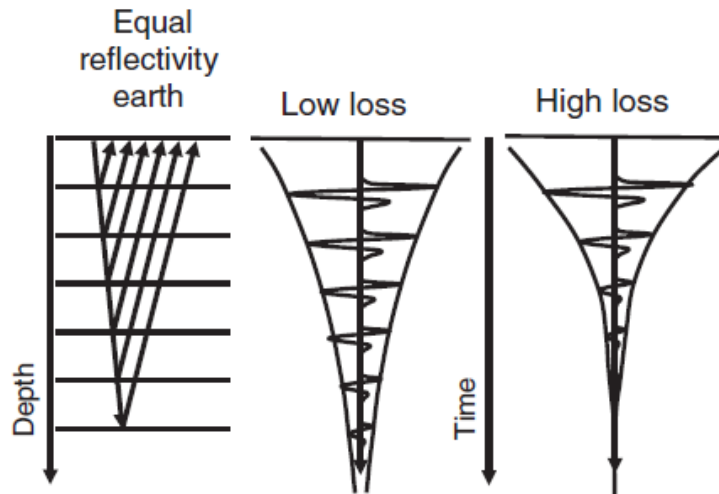


Obr.5. 1: Zpracování toku dat GPR. [1]

Nejlépe propracované jsou softwary založené na seismické bázi.

5.1 Časový zisk

Radarové signály velmi rychle slábnou šířením do země. Signály z větších hloubek jsou slabší v porovnání se signály z menších hloubek. Současné zobrazení těchto signálů vyžaduje před vizuálním zobrazením úpravu. Vyrovnání amplitudy použitím časově závislého zisku kompenzujeme prudký pokles radarových signálů z větších hloubek. Obrázek (Obr.5. 2) ukazuje obecnou povahu amplitudy radarových signálů v závislosti na čase.



Obr.5. 2: Obecná povaha amplitudy radarových signálů v závislosti na čase. [1]

5.2 Korekce nulového času

Při měření GPR dorazí k přijímači jako první vzduchová vlna. Před prvním záznamem vzduchové vlny na grafický výstup nastane prodleva, která závisí na délce kabelů. Tato prodleva se mění během měření vlivem teploty okolního prostředí. Korekce nulového času je umožněna udržením antén v konstantních rozestupech. V softwarových programech je nastavení nulového času často automatické.

5.3 Dekonvoluce

Cílem dekonvoluce je dosáhnout maximálního rozlišení za pomoci maximalizace šířky pásma a snížení rozptylu pulsu. Dekonvoluce údajů GPR zřídka byla hodně prospěšná.

S dekonvolucí úzce souvisí Q filtrování. Čím vyšší frekvence použijeme tím více se signál s rostoucí hloubkou zeslabuje. Q filtr se pokouší tento efekt kompenzovat.

5.4 Filtrování

Používá se pro odstranění nízkofrekvenčního šumu a šumu ve vrcholech amplitud.

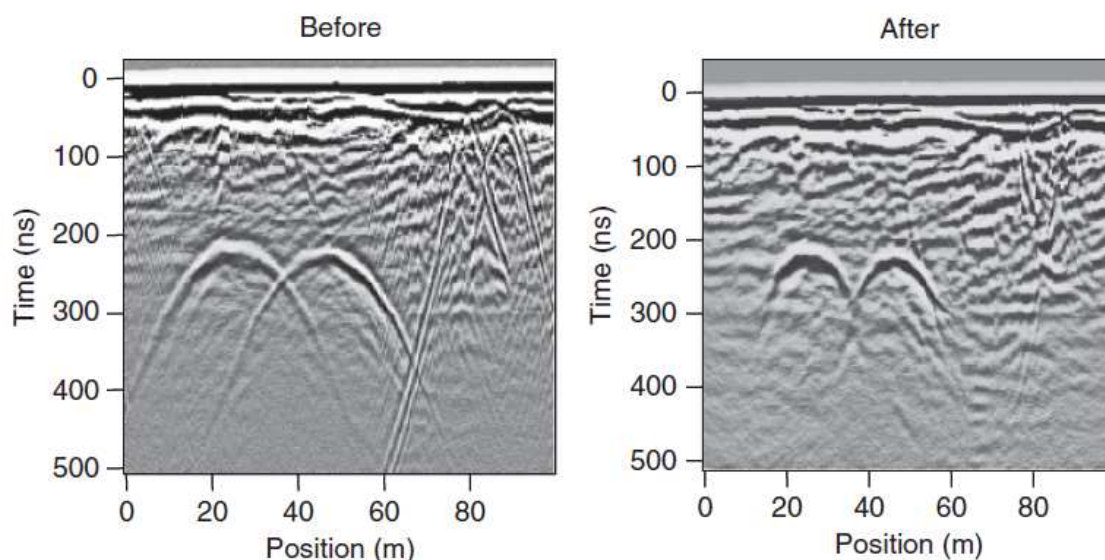
5.5 Odstranění pozadí

Tento šum je vytvářen lehkým zvoněním v anténě a vytvoří přes celou sekci pásmový efekt, který je souběžný s povrchovou vlnou. Odstranění tohoto šumu se provede pomocí okénka, které musí být co nejužší, ale nesmí odstraňovat z profilu skutečné lineární události.

5.6 Migrace

Migrace je prostorová dekonvoluce, která se snaží odstranit zdroj a směrovost přijímače z odražených dat.

Migrace má v terénu omezené využití, aplikuje se na prudce klesající hyperboly difrakce, aby se zjistilo umístění původního zdroje a přesná poloha vnořených struktur.



Obr.5. 3: Snímky tunelu pořízené 50-MHz georadarem před a po migraci. [3]

5.7 Statická výška a konverze hloubky

Na měřicí linii GPR se nejdříve použije dírkování stop pro odstranění všech měřených údajů, které dorazily před nulovým časem, potom se skutečná výška zaznamenaná u měřicích bodů podél profilu zadá do software, který zpracovává data. Záznamy z nulového času jsou zavěšeny na topografický profil aplikací časového posunu pro každou individuální stopu. Konverze hloubky umožňuje zobrazení georadarového profilu formou grafu vzdáleností podél linie profilu a výškou.

5.8 Aplikace zesilovačů

Pro zvýraznění amplitudy signálu s narůstajícím obousměrným časem šíření (tw_t) na datové stopě se používají zesilovače. Obvykle se používají na konci každé série zpracování při zobrazení stop. Ze všech funkcí zesilovačů se nejčastěji využívá automatická kontrola zesilování AGC – je to zesilovač měnící se s časem, který projíždí okénko určením délky podél každé stopy bod po bodu a v každém bodě najde průměrnou amplitudu. Pak je funkce zesílení nastavena tak, aby průměr byl konstantní po celé stopě.

Zpracování dat je téma velice rozsáhlé. Většina GPR dat sebraných například v sedimentárním prostředí vyžadují před interpretací jen minimum zpracování. Čím větší péči tedy věnujeme terénnímu získávání dat, tím snadnější bude jejich zpracování. Nejdůležitější je tedy dobrý plán výzkumu a kontrola kvality v terénu.

6 INTERPRETACE GPR DAT

Součástí georadarové metodologie je interpretace radarových profilů. Zde je nutná dobrá znalost zkoumaného prostředí, cílů výzkumu, měřítka a přesnosti požadované interpretace. Je třeba znát i faktory, které souvisí s elektrickými vlastnosti horninového prostředí.

Při interpretaci záleží především na pochopení vztahu mezi radarovým profilem, terénními podmínkami a měřeným médiem.

7 TVARY IMPULSŮ A JEJICH POPIS

Impuls je krátkodobá relativní výchylka elektrické veličiny z ustálené hodnoty, do níž se po určité době tato veličina opět vrací. Výchylka může být kladná i záporná. Průběh impulsu může mít různý tvar, např. exponenciální, dvojeponenciální, pravoúhlý, Gaussův, Diracův atd. [11]

7.1 Exponenciální a dvojeponenciální impuls

Pro popis signálů se často používá funkce jednotkového skoku $\sigma(t)$, která je definována

$$\sigma(t) = 0 \text{ pro } t < 0 \quad (7.1)$$

$$\sigma(t) = 1 \text{ pro } t \geq 0 \quad (7.2)$$

Exponenciální impuls lze vyjádřit vztahem

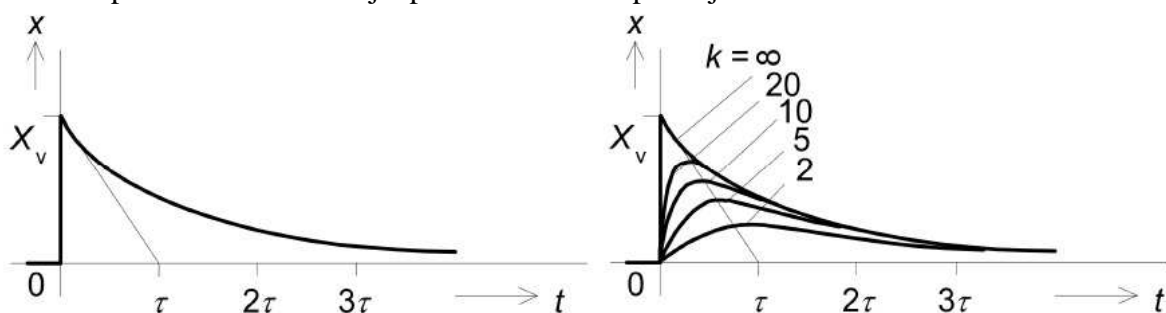
$$x(t) = \sigma(t) \cdot X_v \cdot e^{(-t/\tau)} \quad (7.3)$$

Dvojeponenciální impuls lze vyjádřit vztahem

$$x(t) = \sigma(t) \cdot X_v \cdot [e^{(-t/\tau)} - e^{(-kt/\tau)}] \quad (7.4)$$

kde t je čas v sekundách. Význam časové konstanty τ a veličin X_v a k je zřejmý z Obr.7. 1 [11].

Průběh exponenciálního a dvojeponenciálního impulsu je na Obr.7. 1.

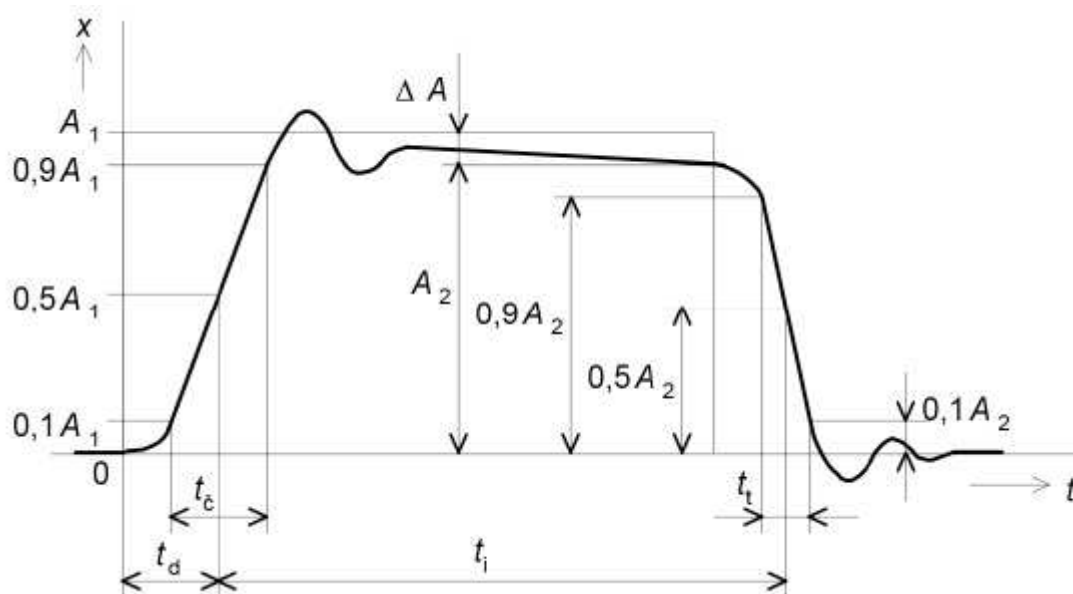


Obr.7. 1: Exponenciální (vlevo) a dvojeponenciální (vpravo) impuls [11].

7.2 Pravoúhlý impuls

Velmi často používané jsou pravoúhlé impulsy, jejichž průběh je složen z čela, temene a týlu impulsu. Ideální pravoúhlý impuls je tvořen dvěma jednotkovými skoky s opačnými znaménky, násobenými stejnou absolutní hodnotou udávající výšku impulsu a časově posunutými o dobu představující šířku impulsu t_i . Čelo a tyl jsou u těchto 3 ideálních impulsů skokové a temeno má konstantní výšku [11].

Za pravoúhlé impulsy se v praxi označují impulsy, které se ideálním jen více méně blíží. Rozdíly mezi reálným a ideálním pravoúhlým impulsem jsou popsány dobou čela t_c , dobou týlu t_t , zpoždění impulsu t_d a pokles temene ΔA [11]. Jednotlivé parametry jsou znázorněny na Obr.7. 2.



Obr.7. 2: Ideální a reálný pravoúhlý impuls a jeho parametry [11]

7.3 Gaussův impuls

Gaussovy impulsy se používají například v širokopásmových UWB systémech [2] a při analýze širokopásmových struktur.

Gaussův impuls je analyticky charakterizován vztahem

$$p(t) = A \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \quad (7.5)$$

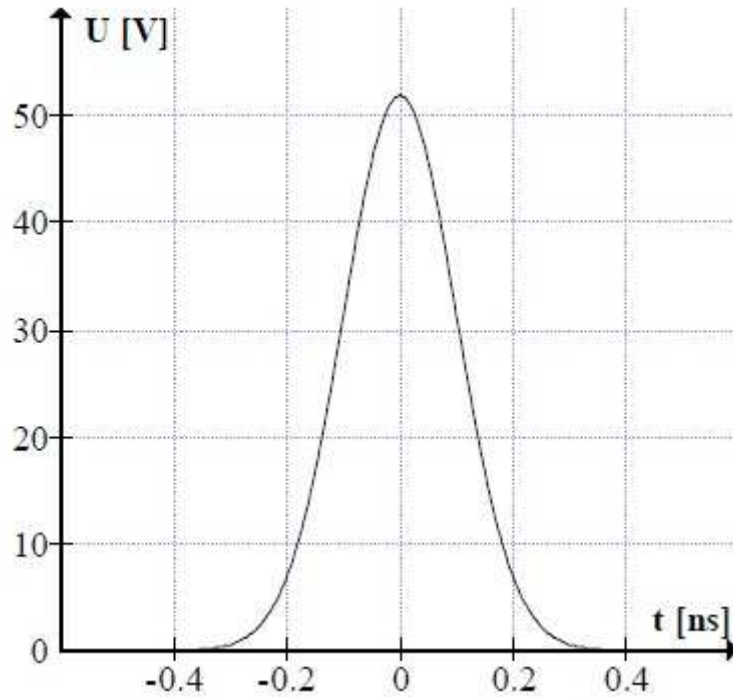
kde A určuje výšku a polaritu impulsu a σ je směrodatná odchylka. Šířka impulsu se vypočte $\tau_p = 2\pi\sigma$. Vztah první derivace Gaussova impulsu, který je nazýván také "monopuls" (monocycle), je

$$p'(t) = A \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \left(-\frac{t}{\sigma^2}\right) \quad (7.6)$$

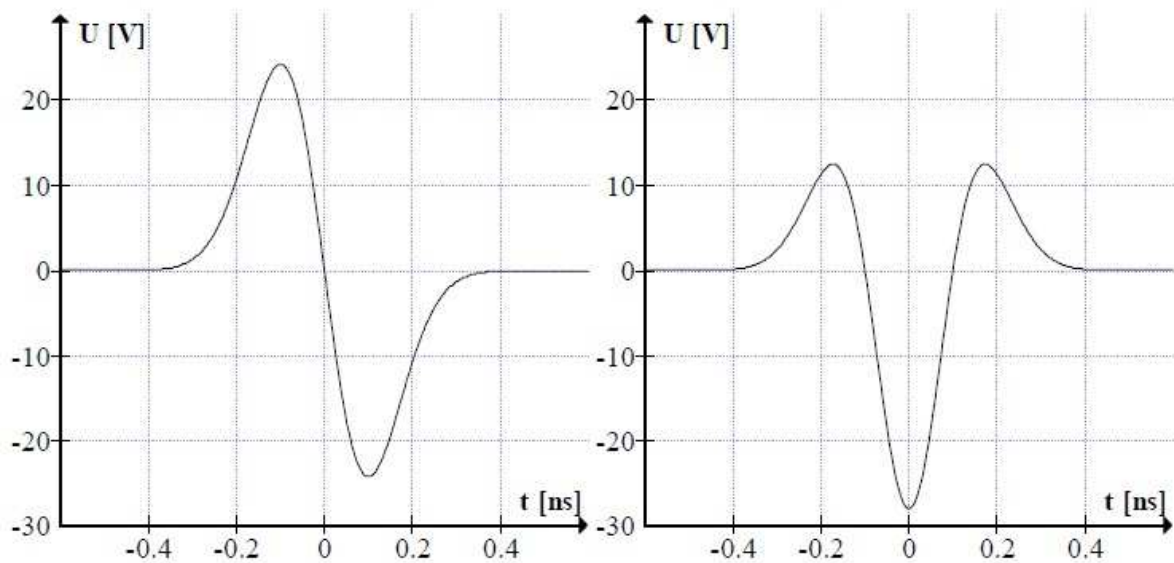
a druhá derivace je popsána vztahem

$$p''(t) = A \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \left(\frac{t}{\sigma^2} - 1 \right) \quad (7.7)$$

Tyto tři typy impulsů jsou zobrazeny na Obr.7. 3 a Obr.7. 4. Obrázky slouží pouze pro představu o tvaru impulsů.



Obr.7. 3: Gaussův impuls.



Obr.7. 4: První (vlevo) a druhá (vpravo) derivace Gaussova impulsu.

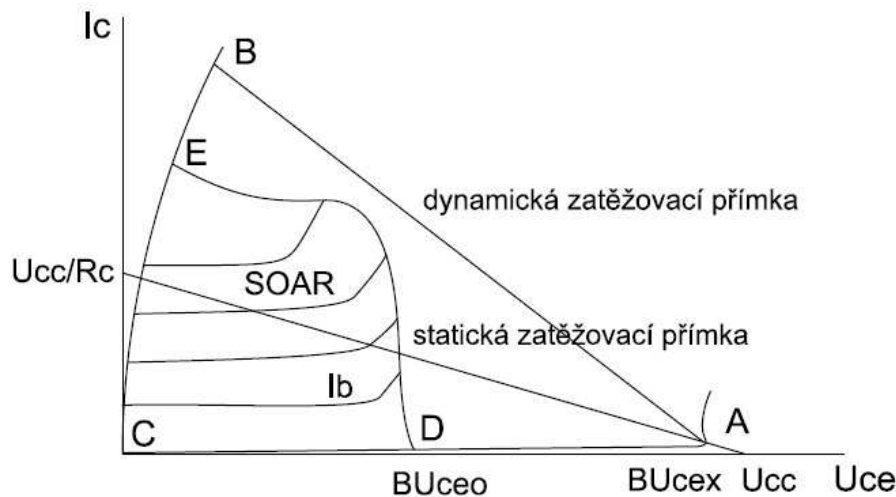
8 PRINCIP GENEROVÁNÍ NAPĚŤOVÝCH IMPULSŮ

8.1 Lavinový tranzistor

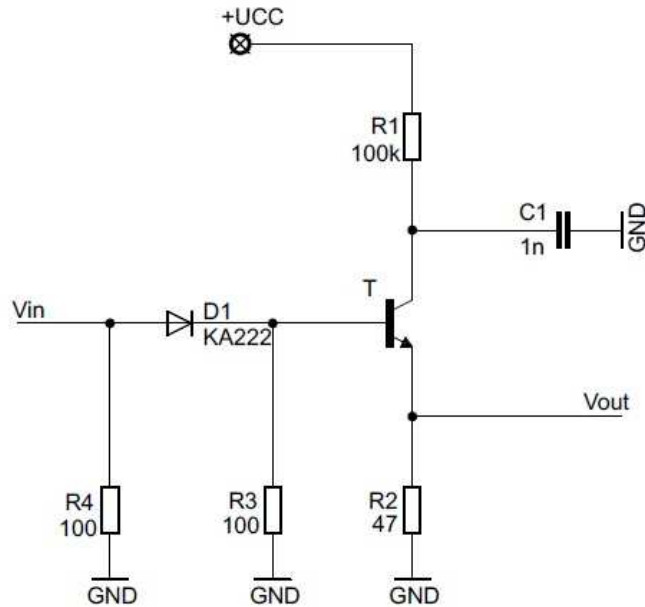
Tranzistor používaný v oblasti lavinového průrazu může být zdrojem velmi strmých impulsů. Tohoto principu se využívá například ve vysílačích a přijímačích UWB systémů.

Lavinový průraz vznikne tehdy, pokud intenzita elektrického pole na závěrně polarizovaném přechodu PN dosáhne takové úrovně, kdy minoritní nosiče získají velkou kinetickou energii a může dojít k nárazové ionizaci atomů krystalové mřížky, tj. vznikají páry elektron-díra. Proud přes přechod prudce vzroste a je limitován pouze externím obvodovým omezením (většinou rezistorem). Pokud by proud nebyl nijak omezen, došlo by k destrukci přechodu. Prudký nárůst proudu lze využít pro vytvoření velmi strmé hrany impulsu.

Situaci při řízení tranzistoru v oblasti lavinového průrazu ukazuje Obr.8. 1 [3]. Bezpečná pracovní oblast SOAR (safe operating active region) je definována body C-D-E, toto je obvykle používaná oblast pro bipolární tranzistor. BU_{ceo} je průrazné napětí přechodu kolektor-báze při otevřené bázi. BU_{cex} je průrazné napětí mezi kolektorem a emitorem při záporném předpětí na bázi [2]. Pro lavinový průraz je nutné se pohybovat s předpětím někde mezi BU_{ceo} a BU_{cex} s nulovým nebo malým záporným předpětím na bázi [2].



Obr.8. 1: Charakteristiky bipolárního tranzistoru.[3]



Obr.8. 2: Schéma impulsního generátoru s lavinovým tranzistorem

Obvod na Obr.8. 2 je řízen kladnými pulsy. Kondenzátor C1 je nabíjen skrz odpor R1 dokud na něm napětí nedosáhne hodnoty BU_{cex} . Tranzistor je nyní ve stabilním stavu v bodě A. Obvod v tomto stavu zůstane dokud se na vstup báze nepřivede spouštěcí impuls. Ten způsobí lavinový průraz tranzistoru. Díky C1 a R1, které definují dynamickou zatěžovací přímku vedoucí mimo bezpečnou pracovní oblast SOAR, napětí U_{ce} velmi rychle spadne do bodu B. Jakmile je kondenzátor C1 vybit pracovní bod se přesouvá do bodu C. Tranzistor se uzavírá a vrací se zpět do bodu A. Kondenzátor C1 se nabíjí přes rezistor R1 a celý cyklus se může zopakovat. Hodnota R1 musí být dostatečně velká, aby nedošlo k poškození tranzistoru, ale příliš velká hodnota způsobí delší nabíjení kondenzátoru C1.

Generování pulsů bylo ověřeno v laboratoři. Do obvodu na Obr.8. 2 byly postupně zapojovány různé spínací bipolární tranzistory a pomocí osciloskopu Agilent 54626A byly měřeny časové průběhy generátoru pro různá napájecí napětí U_{cc} . Velikost amplitudy spouštěcího obdelníkového impulsu který je přes diodu přiváděn na bázi tranzistoru je 5 V. Porovnáním naměřených časových průběhů výstupního pulsu generátoru, které jsou uvedeny níže, byl pro realizaci finálního impulsního generátoru vybrán spínací tranzistor BSX59.

8.2 Časové průběhy pulsů generátoru s různými tranzistory:

$U_{(BR)CEO}$ = průrazné napětí přechodu kolektor-emitor

$U_{(BR)CBO}$ = průrazné napětí přechodu kolektor-báze

Tranzistor BSX59

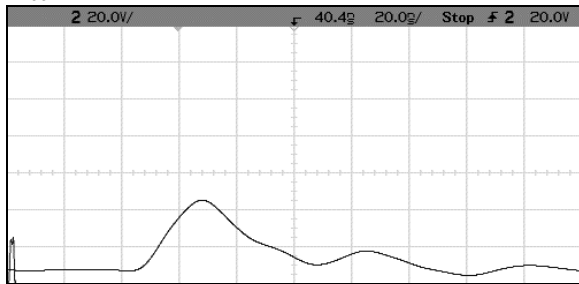
$U_{(BR)CEO} = 45 \text{ V}$

$U_{(BR)CBO} = 70 \text{ V}$

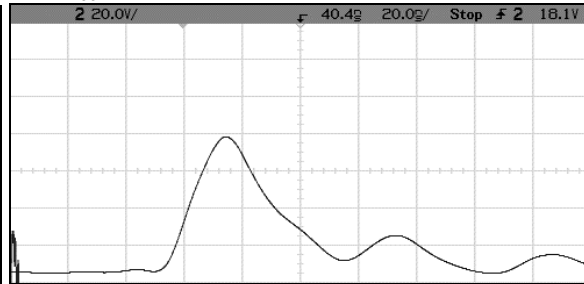
Měřítka rastru: Svislá osa: 20 V/dílek

Vodorovná osa: 20 ns/dílek

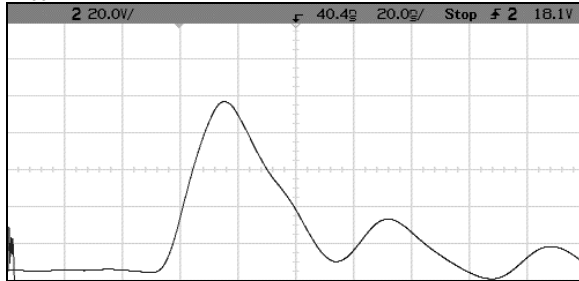
$U_{cc} = 70 \text{ V}$



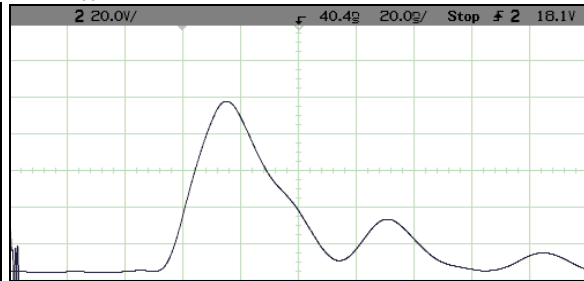
$U_{cc} = 100 \text{ V}$



$U_{cc} = 150 \text{ V}$



$U_{cc} = 200 \text{ V}$



Obr.8. 3: Časové průběhy pulsů generátoru

Tranzistor KSY21

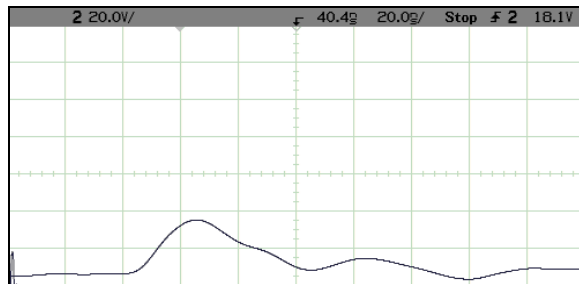
$U_{(BR)CEO} = 15 \text{ V}$

$U_{(BR)CBO} = 40 \text{ V}$

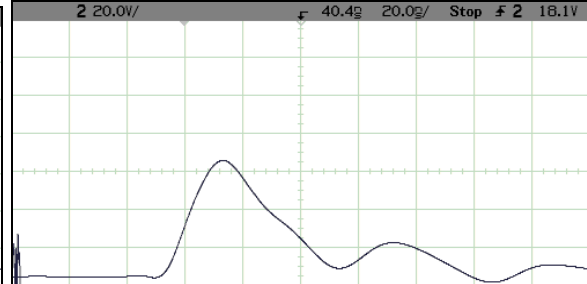
Měřítka rastru: Svislá osa: 20 V/dílek

Vodorovná osa: 20 ns/dílek

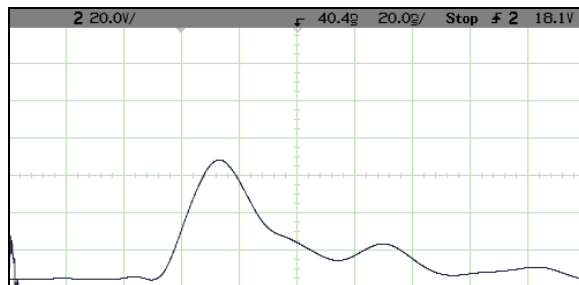
$U_{cc} = 50 \text{ V}$



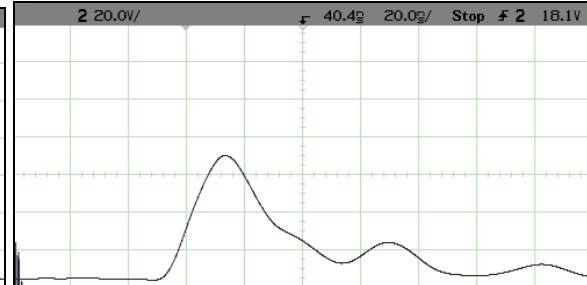
$U_{cc} = 100 \text{ V}$



$U_{cc} = 150 \text{ V}$



$U_{cc} = 200 \text{ V}$



Obr.8. 4: Časové průběhy pulsů generátoru

Tranzistor KSY34

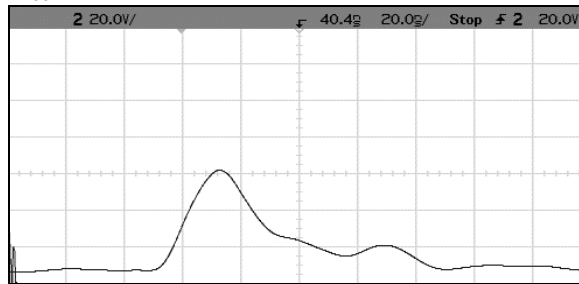
$U_{(BR)CEO} = 40 \text{ V}$

$U_{(BR)CBO} = 60 \text{ V}$

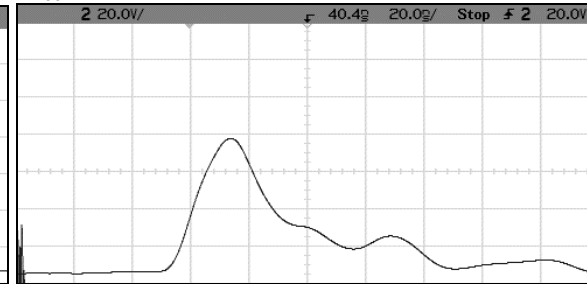
Měřítka rastru: Svislá osa: 20 V/dílek

Vodorovná osa: 20 ns/dílek

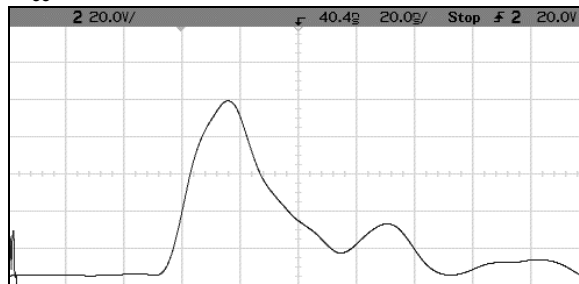
$U_{cc} = 80 \text{ V}$



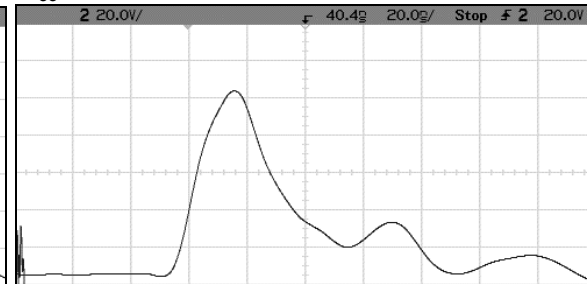
$U_{cc} = 100 \text{ V}$



$U_{cc} = 150 \text{ V}$



$U_{cc} = 200 \text{ V}$



Obr.8. 5: Časové průběhy pulsů generátoru

Tranzistor KSY62

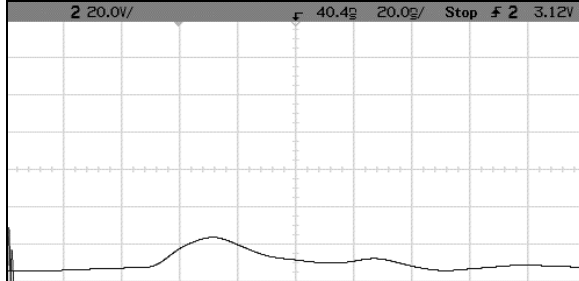
$U_{(BR)CEO} = 15 \text{ V}$

$U_{(BR)CBO} = 25 \text{ V}$

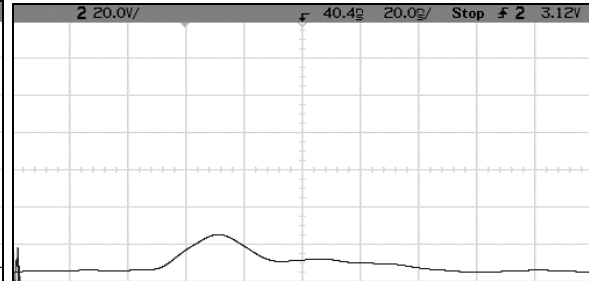
Měřítka rastru: Svislá osa: 20 V/dílek

Vodorovná osa: 20 ns/dílek

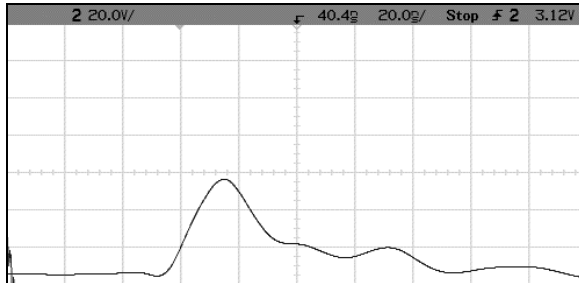
$U_{cc} = 40 \text{ V}$



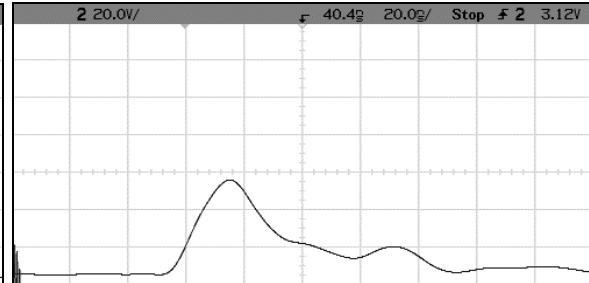
$U_{cc} = 100 \text{ V}$



$U_{cc} = 150 \text{ V}$



$U_{cc} = 200 \text{ V}$



Obr.8. 6: Časové průběhy pulsů generátoru

Tranzistor KSY63

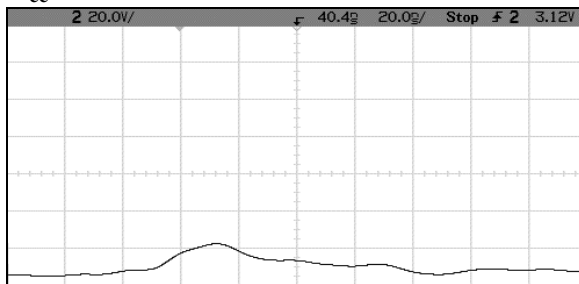
$U_{(BR)CEO} = 15 \text{ V}$

$U_{(BR)CBO} = 40 \text{ V}$

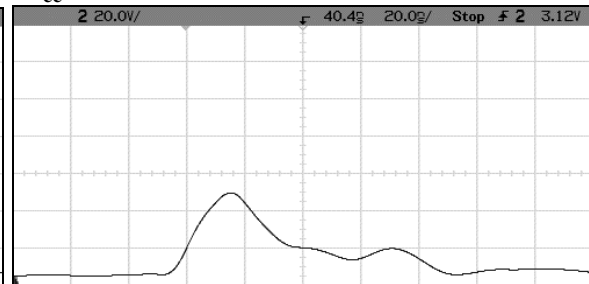
Měřítka rastru: Svislá osa: 20 V/dílek

Vodorovná osa: 20 ns/dílek

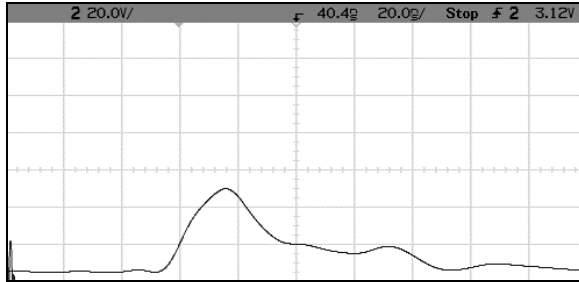
$U_{cc} = 40 \text{ V}$



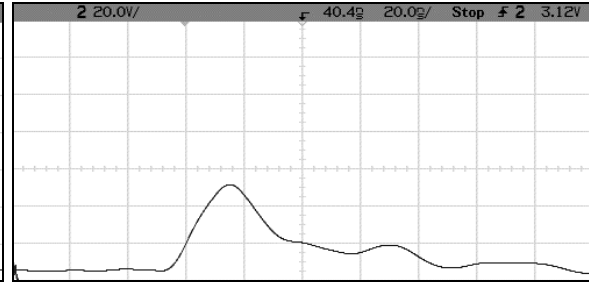
$U_{cc} = 100 \text{ V}$



$U_{cc} = 150 \text{ V}$



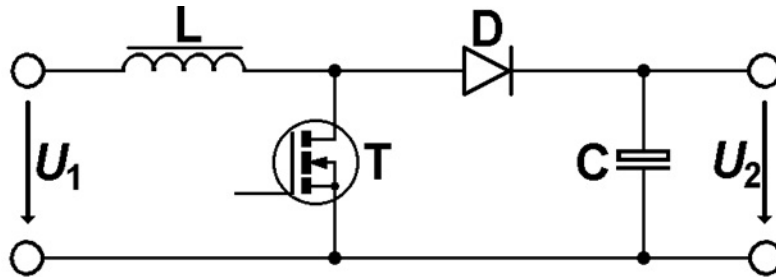
$U_{cc} = 200 \text{ V}$



Obr.8. 7: Časové průběhy pulsů generátoru

8.3 Zvyšující DC-DC měnič

Generátor by měl být mobilní, a proto by jako zdroj energie měla být použita baterie a k ní připojený DC-DC měnič na vysoké napětí. Principiální zapojení zvyšujícího DC-DC měniče je na Obr.8. 8 [5].



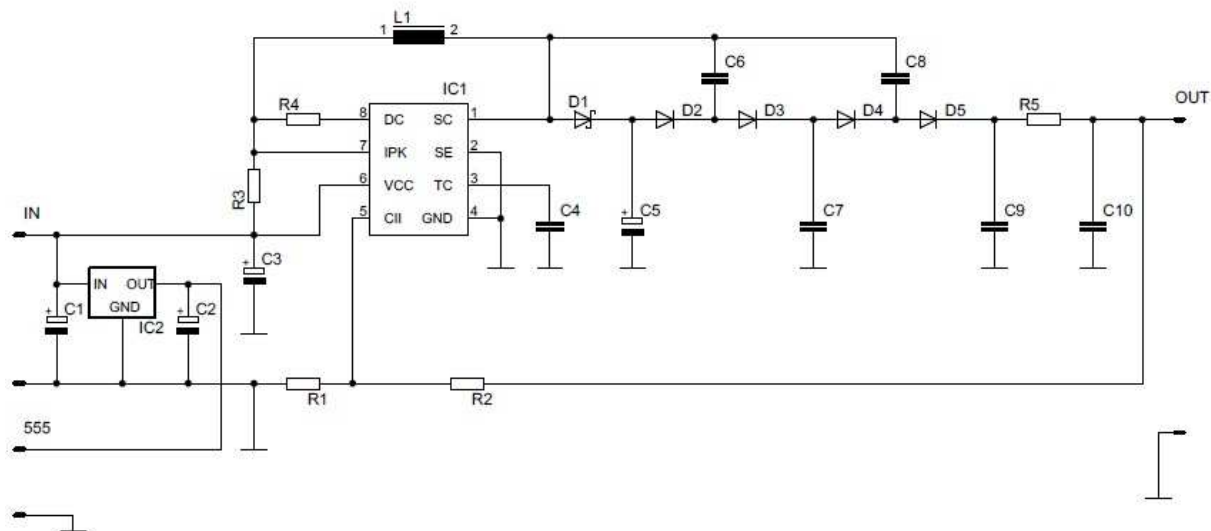
Obr.8. 8: Principiální zapojení zvyšujícího DC-DC měniče.[5]

Princip činnosti předpokládá kapacitní zátěž, kterou můžeme realizovat uměle, paralelním připojením kondenzátoru k výstupním svorkám. Během doby sepnutí tranzistoru se výstupní kondenzátor oddělený diodou D vybíjí do zátěže. Současně se průtokem proudu ze zdroje vstupního napětí přes otevřený tranzistor akumuluje energie v magnetickém poli induktoru. V okamžiku rozepnutí tranzistoru se induktor snaží ze své povahy udržet původní směr a velikost proudu a na induktoru vzniká indukované napětí, které se přičítá k napětí zdroje.[6] Na toto napětí se přes propustně polarizovanou diodu nabíjí výstupní kondenzátor, který po opětovném sepnutí tranzistoru toto napětí udržuje. Indukované napětí je úměrné indukčnosti L a změně proudu cívkou za čas (tedy rychlosti spínání) a teoreticky může nabývat jakkoli vysokých hodnot. Po sečtení se vstupním napětím dosáhneme na výstupním kondenzátoru a tudíž i na výstupu měniče vždy vyšší napětí než vstupní.[6] Pro výstupní napětí zvyšujícího měniče platí:

$$U = \frac{t_{on} \cdot t_{off}}{t_{off}} \cdot U_1 = \frac{T}{t_{off}} \cdot U_1 = \frac{1}{1 - \delta} \cdot U_1 \quad [6] \quad (8.1)$$

9 REALIZACE ZVYŠUJÍCÍHO DC-DC MĚNIČE

Pro impulsní generátor bude použit zvyšující DC-DC měnič z 12 V na 100 V, který je na Obr.9. 1.



Obr.9. 1: Zapojení zvyšujícího DC-DC měniče

Zapojení zvyšujícího měniče vychází ze základního zapojení obvodu MC34063, které bylo převzato z datasheetu součástky [7]. Maximální výstupní napětí integrovaného obvodu MC34063, které se nastavuje odporovým děličem s rezistory R1 a R2 je 40 V, proto byl na výstup zařazen násobič složený z diod D2-D5 a kondenzátorů C6 až C10, kterým je výstupní napětí zvýšeno na požadovaných 100 V. Proudový odběr při 12 V napájení bez připojeného impulsního generátoru je 30 mA. Po připojení generátoru vzroste na 90 mA

Vztahy pro výpočet odporového děliče:

$$U_{out} = \frac{1,25 \cdot (R1 + R2)}{R2} \quad R1 = R2 \cdot \left(\frac{U_{out}}{1,25} - 1 \right) \quad (9.2)$$

Na vstup měniče byl zařazen stabilizátor napětí z jehož výstupu je napájen trigger s časovačem NE555 který vytváří spouštěcí pulsy pro tvarovací obvod.

Schottkyho dioda D1, která je použita v zapojení musí být dimenzována na velikost výstupního napětí jinak by došlo k jejímu proražení a zkratu. To by mělo za následek velké zvýšení proudu na vstupu obvodu, což by zničilo integrovaný obvod MC34063. Tlumivka L1 má toroidní jádro. Deska plošného spoje pro měnič napětí byla navržena v programu Eagle. Návrh desky plošného spoje je uveden v příloze.

10 REALIZACE IMPULSNÍHO GENERÁTORU

Schéma zapojení impulsního generátoru je na Obr.10. 1. Impulsní generátor má nastavitelnou šířku a velikost výstupního pulsu. Princip zapojení vychází z architektury Marx-Bank kdy je do série zapojeno několik lavinových tranzistorů, které generují požadovaný napěťový puls. Paralelně spojené transformátory, které jsou přes odpory připojeny na báze tranzistorů slouží ke galvanickému oddělení triggeru od impulsního generátoru.

Pro generátor byly zvoleny spínací tranzistory BSX59, které měly z proměřených tranzistorů nejlepší časové průběhy výstupního pulsu. Impulsní generátor generuje pulsy, o frekvencích 60 – 100 MHz a amplitudě 98 – 110 V, které jsou nastavitelné pomocí kapacitních trimrů C9 a C10. Na výstupy impulsního generátoru je připojena zátěž o impedanci 50 Ω (simulace antény). Trigger je tvořen časovačem NE555, který vytváří obdelníkové pulsy o frekvenci cca 250 kHz, které jsou přes oddělovací transformátory přiváděny na báze spínacích tranzistorů. Frekvence triggeru se nastavuje pomocí odporového děliče složeného z odporů R21 a R22 a pomocí kondenzátoru C8.

Vztahy pro výpočet šířky výstupního pulzu časovače NE555:

$$t_{nab} \approx 0,693 \cdot C8 \cdot (R21 + R22) \quad (10.1)$$

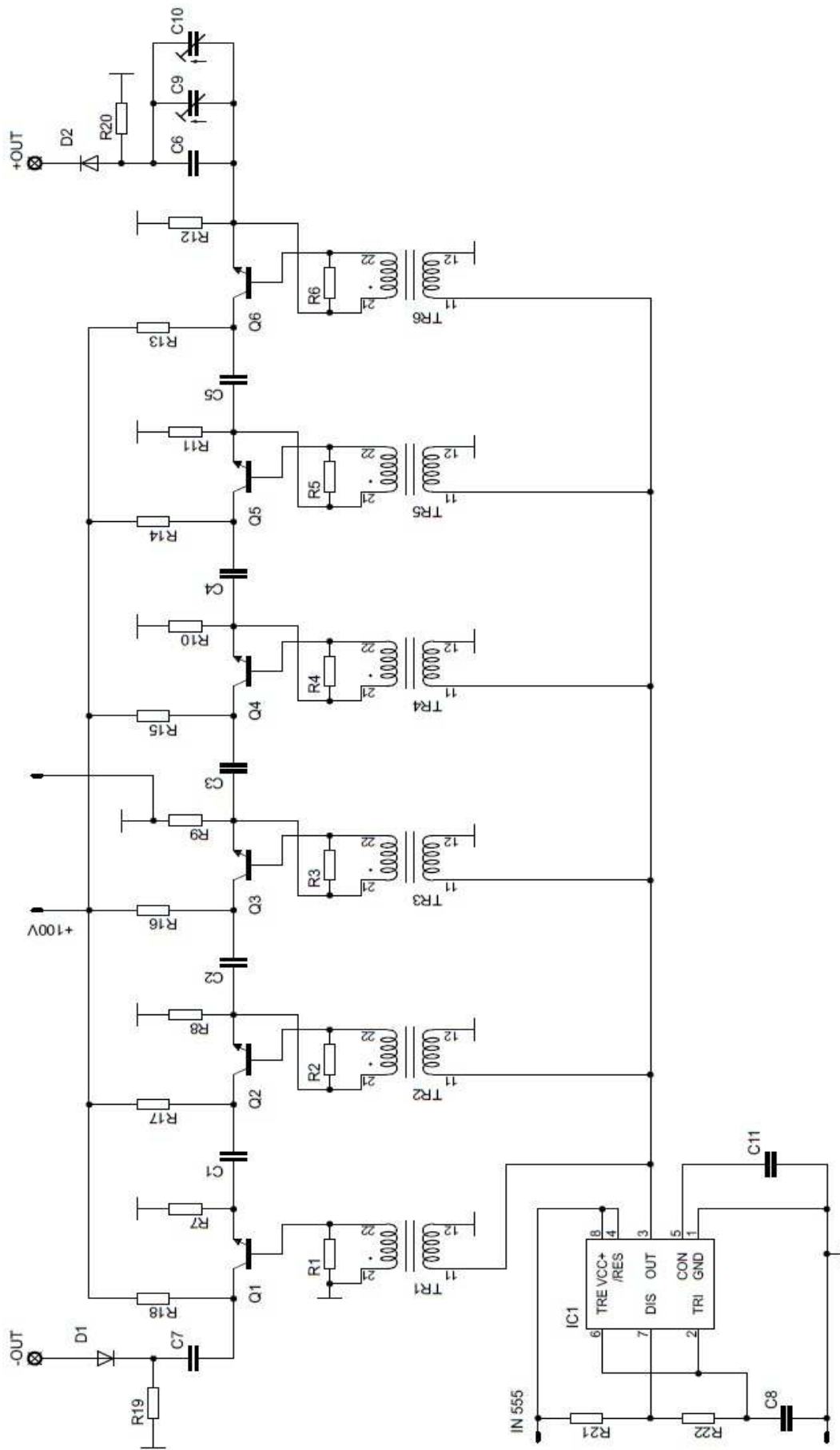
$$t_{vyb} \approx 0,693 \cdot C8 \cdot R22 \quad (10.2)$$

$$t = t_{nab} + t_{vyb} \quad (10.3)$$

Obdelníkový signál z triggeru, který je přiveden na báze tranzistorů spouští lavinový průraz tranzistorů, jenž jsou napájeny vysokým stejnosměrným napětím 100 V z DC-DC měniče napětí. Generátor vytváří záporný napěťový impulz (na kolektoru) a kladný napěťový impulz (na emitoru), které jsou přivedeny na zátěž.

Časové průběhy pulsu generátoru, které jsou uvedeny na níže, byly naměřeny na osciloskopu HP54603B se šířkou pásma 60 MHz. Výstupní puls byl měřen jako rozdílový puls emitoru (kanál 1) a kolektoru (kanál 2). Naměřené časové průběhy na výstupu impulsního generátoru přibližně odpovídaly předpokladu. Vzhledem k šířce pásma použitého osciloskopu je pravděpodobné, že skutečná doba čela může být kratší než změřená.

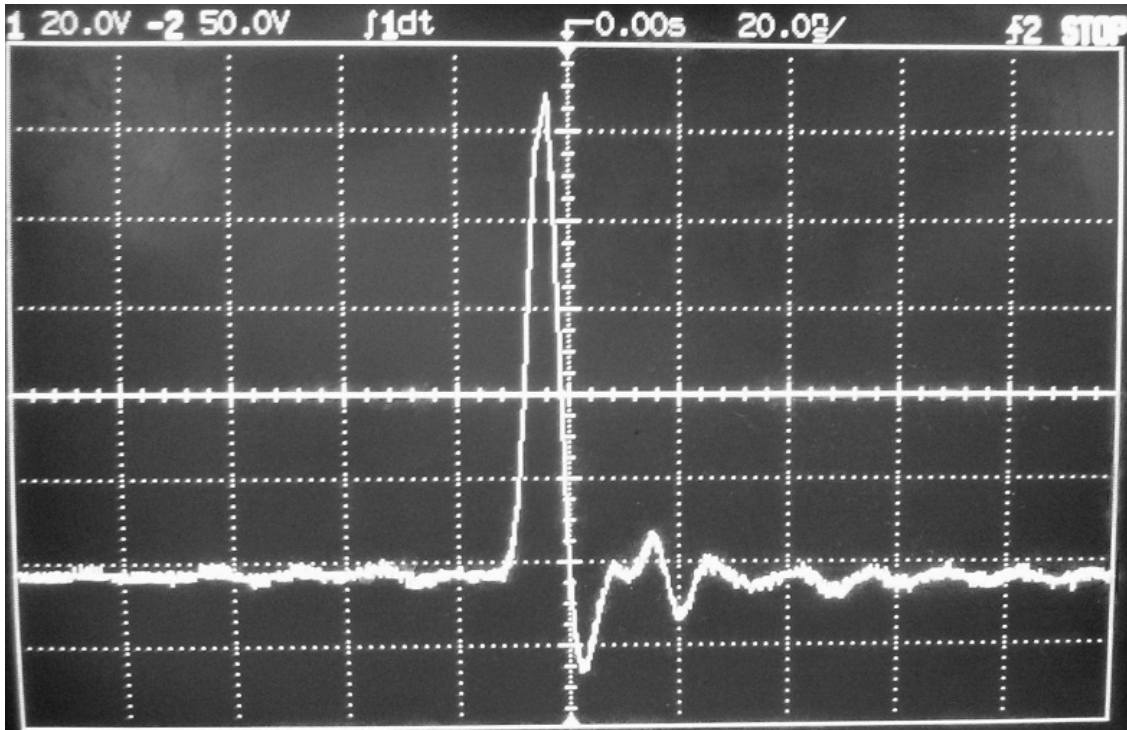
U kapacitních trimrů C9 a C10, které slouží k nastavení výstupního pulsu generátoru, je možno měnit kapacitu v rozsahu 5 – 65 pF. Trimry jsou zapojeny paralelně, takže ve výsledku se dá kapacita měnit v rozsahu od 10 pF do 130 pF. Deska plošného spoje pro impulsní generátor byla navržena v programu Eagle. Návrh desky plošného spoje je uveden v příloze.



Obr.10. 1: Schéma impulsného generátoru s Marx-Bank architektúrou

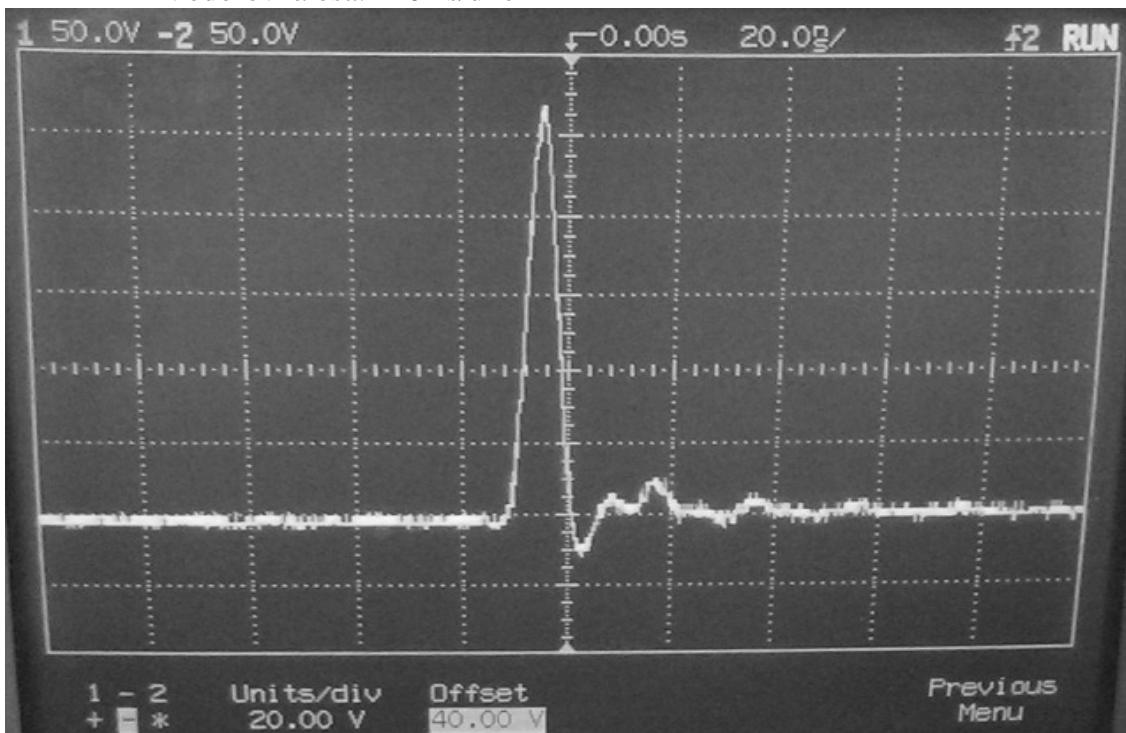
Naměřené charakteristiky na zatíženém výstupu impulsního generátoru:

Šířka impulsu: $t_i = 4\text{ns}$ Doba čela: $t_c = 4\text{ns}$ Doba týlu: $t_t = 5\text{ns}$ Amplituda: $A = 110\text{V}$
Měřítka rastru: Svislá osa: 20 V/dílek
Vodorovná osa: 20 ns/dílek



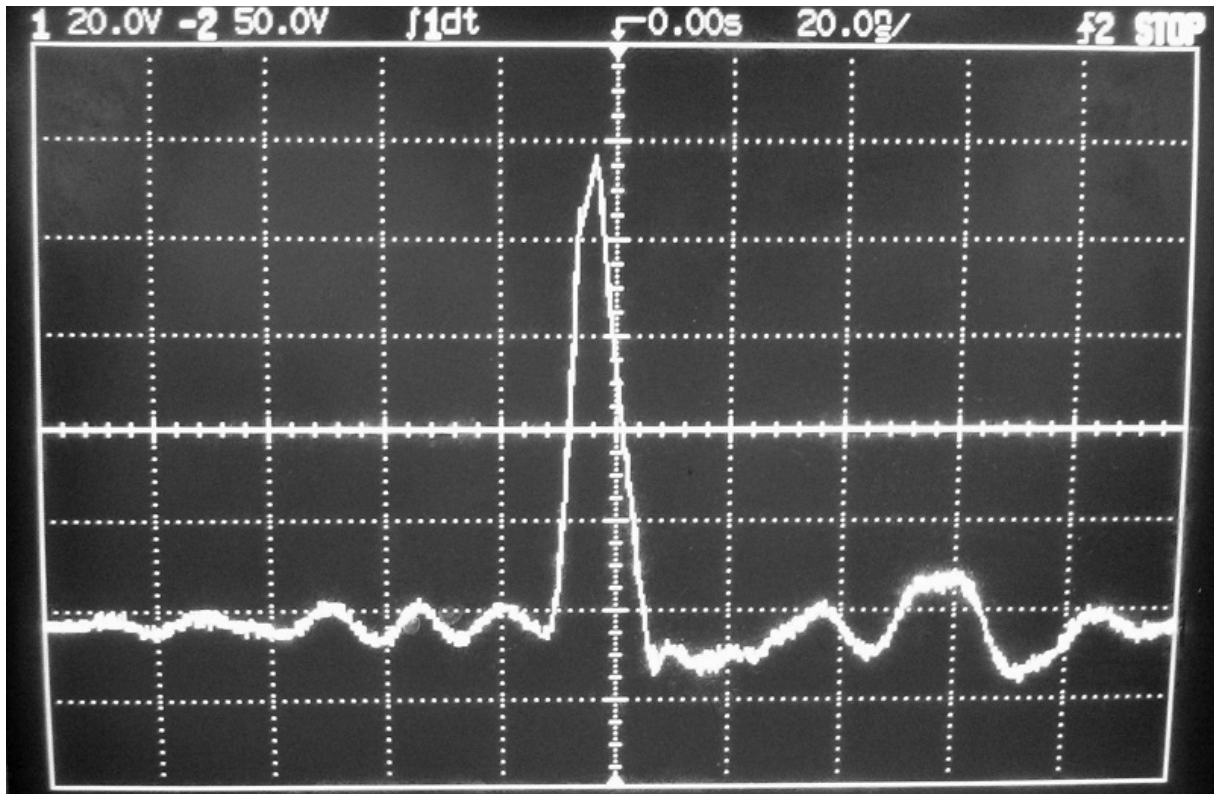
Obr.10. 2: Časový průběh pulsu generátoru

Šířka impulsu: $t_i = 5\text{ns}$ Doba čela: $t_c = 5\text{ns}$ Doba týlu: $t_t = 6\text{ns}$ Amplituda: $A = 108\text{V}$
Měřítka rastru: Svislá osa: 20 V/dílek
Vodorovná osa: 20 ns/dílek

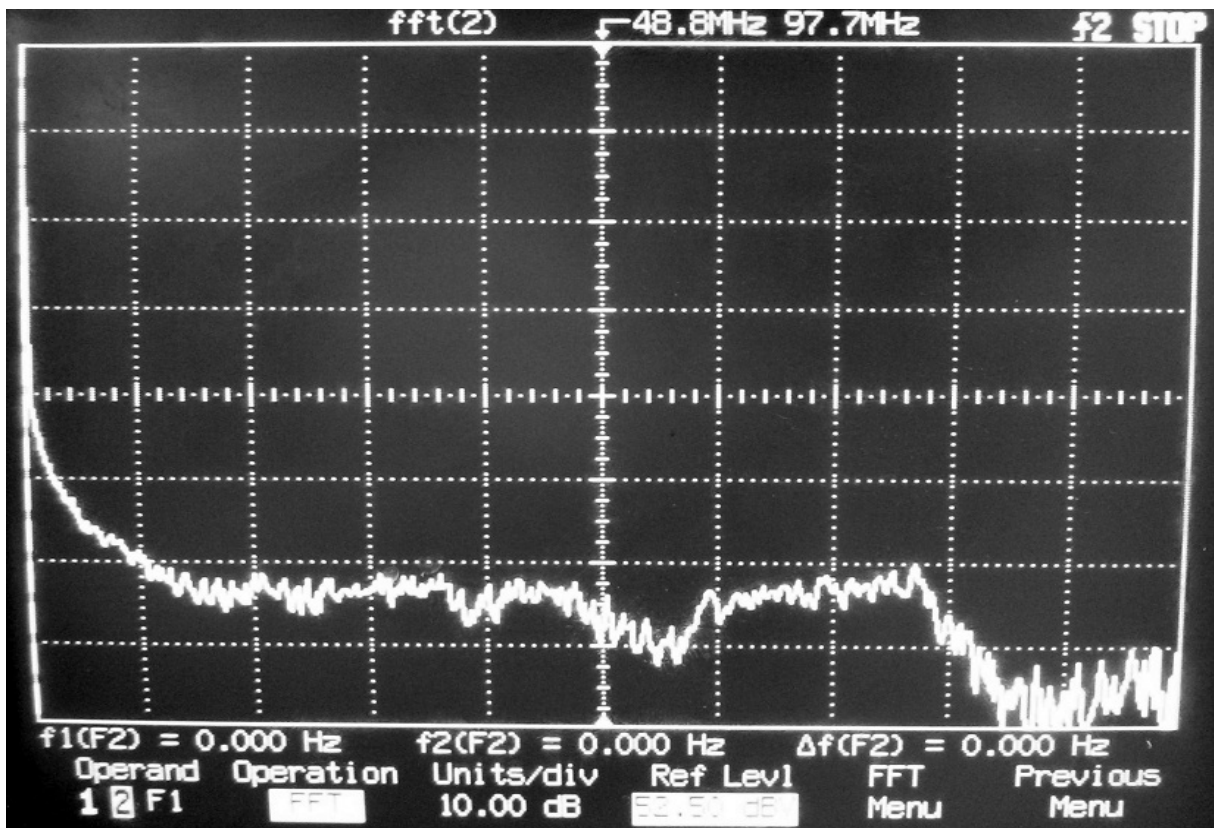


Obr.10. 3: Časový průběh pulsu generátoru

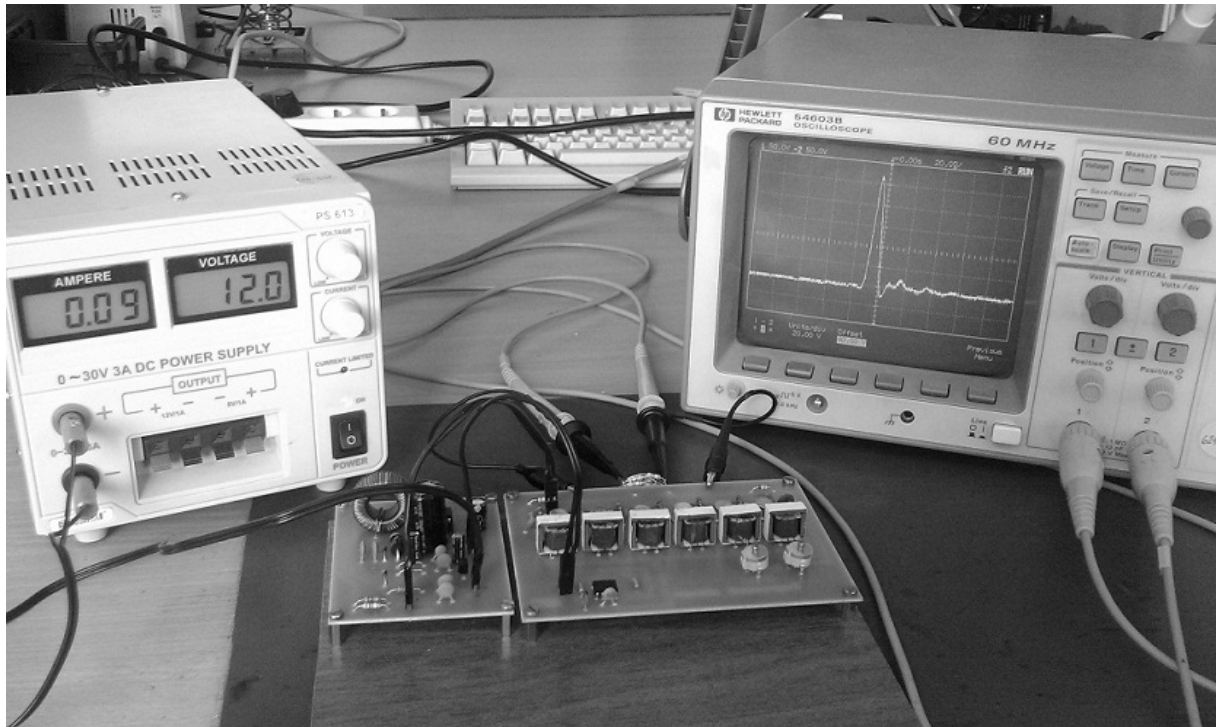
Šířka impulsu: $t_i = 9\text{ns}$ Doba čela: $t_c = 4\text{ns}$ Doba týlu: $t_t = 8\text{ns}$ Amplituda: $A = 98\text{V}$
 Měřítko rastru: Svislá osa: 20 V/dílek
 Vodorovná osa: 20 ns/dílek



Obr.10. 4: Časový průběh pulsu generátoru



Obr.10. 5: Spektrum signálu



Obr.10. 6: Fotografie pracoviště

11 ZÁVĚR

Práce se zabývá návrhem generátoru pulsů, který je založen na principu lavinového průrazu. Generátor s lavinovým tranzistorem umožňuje generovat vysokonapěťové pulsy s velmi strmou náběžnou hranou a krátkou dobou trvání. Byl realizován generátor jehož funkčnost byla ověřena v laboratoři. Do generátoru byly postupně zapojovány různé typy spínacích tranzistorů a pro různá napájecí napětí, byly na osciloskopu měřeny časové průběhy pulsů na výstupu generátoru. Poté bylo navrženo řešení finálního impulsního generátoru a byla provedena jeho realizace. Impulsní generátor má nastavitelnou šířku výstupního pulsu v rozmezí 60 – 100 MHz a amplitudu v rozmezí 98 – 110 V. K impulsnímu generátoru byl také navržen a zkonstruován zvyšující DC-DC měnič napětí z 12 V na 100 V, aby bylo možné impulsní generátor napájet bateriově. Celé zařízení má při napájecím napětí 12 V proudový odběr 90 mA.

Nakonec bylo provedeno měření časových průběhů pulsů na výstupu impulsního generátoru pomocí osciloskopu HP 54603B s šířkou pásma 60 MHz. Naměřené průběhy odpovídaly předpokladu. Vzhledem k šířce pásma použitého osciloskopu je pravděpodobné, že skutečná doba čela výstupního pulsu mohla být kratší než změřená.

12 LITERATURA

- [1] JOL, H. M. Ground Penetration Radars: Theory and Applications. Amsterdam: Elsevier Science, 2009. 524s
- [2] REED, J. H. *An Introduction to Ultra Wideband Communication Systems*. [s.l.]:Prentice Hall PTR, 2005. 672 s. ISBN 0-13-148103-7.
- [3] BRAMSON, M. Application of avalanche transistors to pulse generators. *Nuclear Science, IRE Transactions on* . 1962, 9, s. 35-37. ISSN 0096-2015.
- [4] KINGSLEY, S., QUEGAN, S. Understanding Radar Systems. Raleigh: SciTech Publishing, 1999.
- [5] ŠEBESTA J., *Napájení elektronických zařízení* , prezentace přednášek [online], Dostupné na WWW
<https://krel.feec.vutbr.cz/VYUKA/B_EST/prezencni/BNEZ/P/>
- [6] ŠEBESTA J., *Napájení elektronických zařízení* , laboratorní cvičení [online], Dostupné na WWW
< https://krel.feec.vutbr.cz/VYUKA/B_EST/prezencni/BNEZ/L/>
- [10] MOTOROLA MC34063 DC-to-DC Converter Control Circuit
Dostupné na WWW
<<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/motorola/MC34063A.pdf>>
- [11] KOLOUCH, J., BIOLKOVÁ, V. *Impulzová a číslicová technika*. [s.l.]:[s.n.], 2009.185s.

SEZNAM VELIČIN, SYMBOLŮ A ZKRATEK

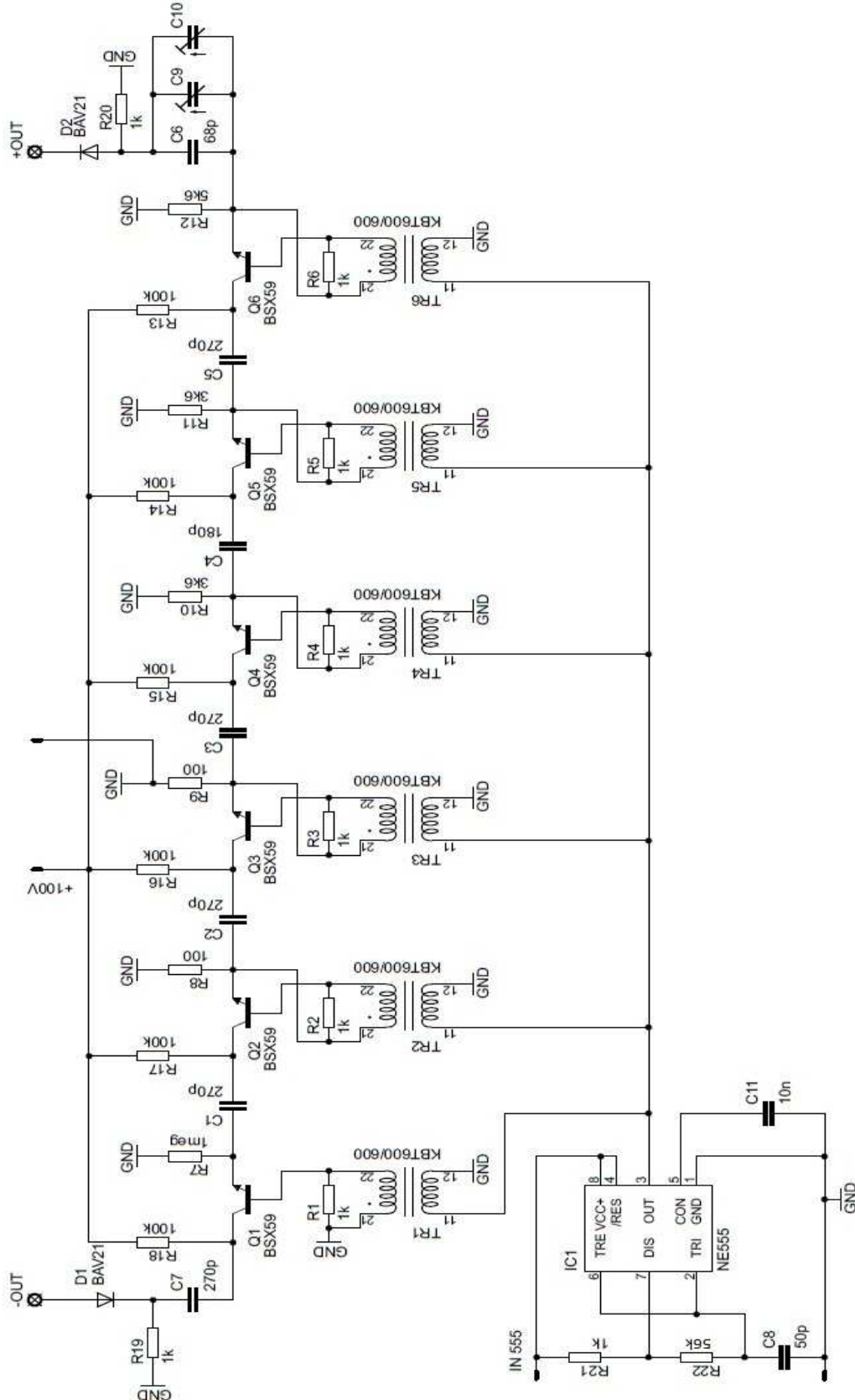
α	útlum
λ	vlnová délka
B	magnetická indukce
c	rychlost světla
D	elektrická indukce
E	intenzita elektrického pole
EM	elektromagnetické pole
ε	elektrická permitivita
ε_r	relativní permitivita
GPR	Ground Penetrating Radar
H	intenzita magnetického pole
j	hustota elektrického proudu
Δl	laterální rozlišení
μ	magnetická permeabilita
ρ	hustota volného náboje
SOAR	Safe Operating Active Region
t_c	doba čela
t_d	doba zpoždění
t_i	šířka impulsu
t_t	doba týlu
TE	příčně elektrické pole
TM	příčně magnetické pole
τ	časová konstanta
UHF	Ultra High Frequency
UWB	Ultra Wide Band
v	rychlost
W	šířka impulsu
ω	úhlová rychlost
σ	elektrická vodivost
$\sigma(t)$	funkce jednotkového skoku

OBSAH PŘÍLOHY

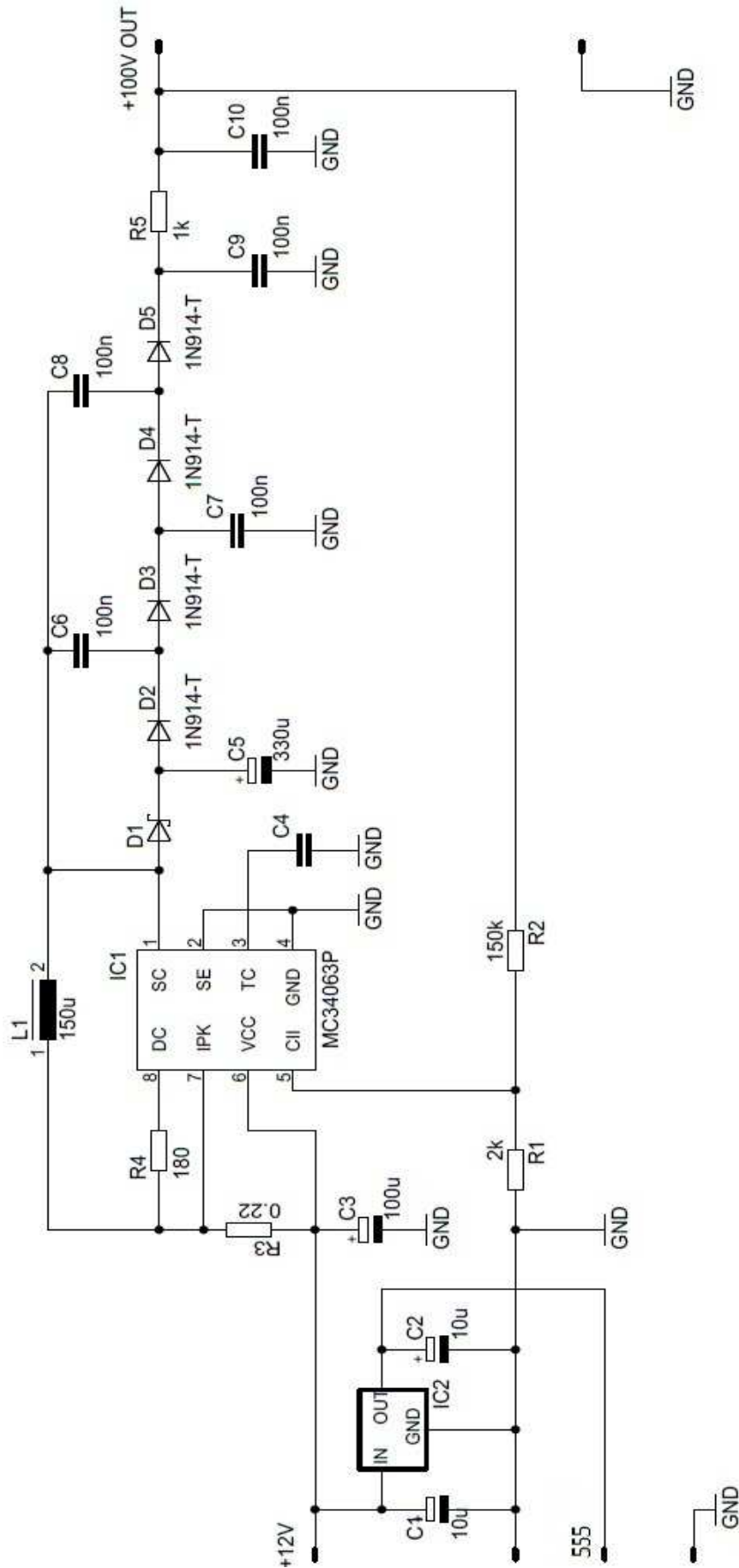
A NÁVRH ZAŘÍZENÍ-SCHÉMATA	44
OBVODOVÉ ZAPOJENÍ – IMPULSNÍ GENERÁTOR	44
OBVODOVÉ ZAPOJENÍ – ZVYŠUJÍCÍ DC-DC MĚNIČ NAPĚTÍ.....	45
B NÁVRH ZAŘÍZENÍ – PLOŠNÉ SPOJE	46
DESKA PLOŠNÉHO SPOJE – IMPULSNÍ GENERÁTOR – BOTTOM.....	46
ROZMÍSTĚNÍ SOUČÁSTEK – IMPULSNÍ GENERÁTOR – TOP	46
DESKA PLOŠNÉHO SPOJE – ZVYŠUJÍCÍ DC-DC MĚNIČ NAPĚTÍ – BOTTOM	47
ROZMÍSTĚNÍ SOUČÁSTEK – ZVYŠUJÍCÍ DC-DC MĚNIČ NAPĚTÍ – TOP	47
C SEZNAM SOUČÁSTEK	48
D FOTOGALERIE	50
ZVYŠUJÍCÍ DC-DC MĚNIČ NAPĚTÍ:.....	50
IMPULSNÍ GENERÁTOR:	50

A NÁVRH ZAŘÍZENÍ-SCHÉMATA

Obvodové zapojení – impulsní generátor

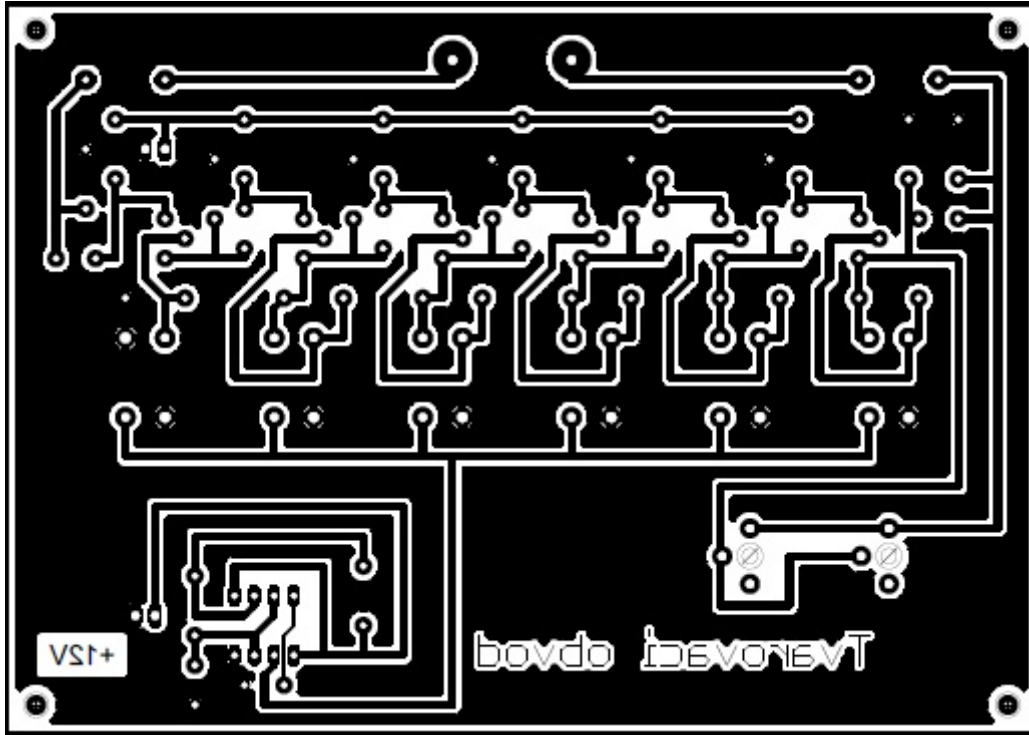


Obvodové zapojení – zvyšující DC-DC měnič napětí



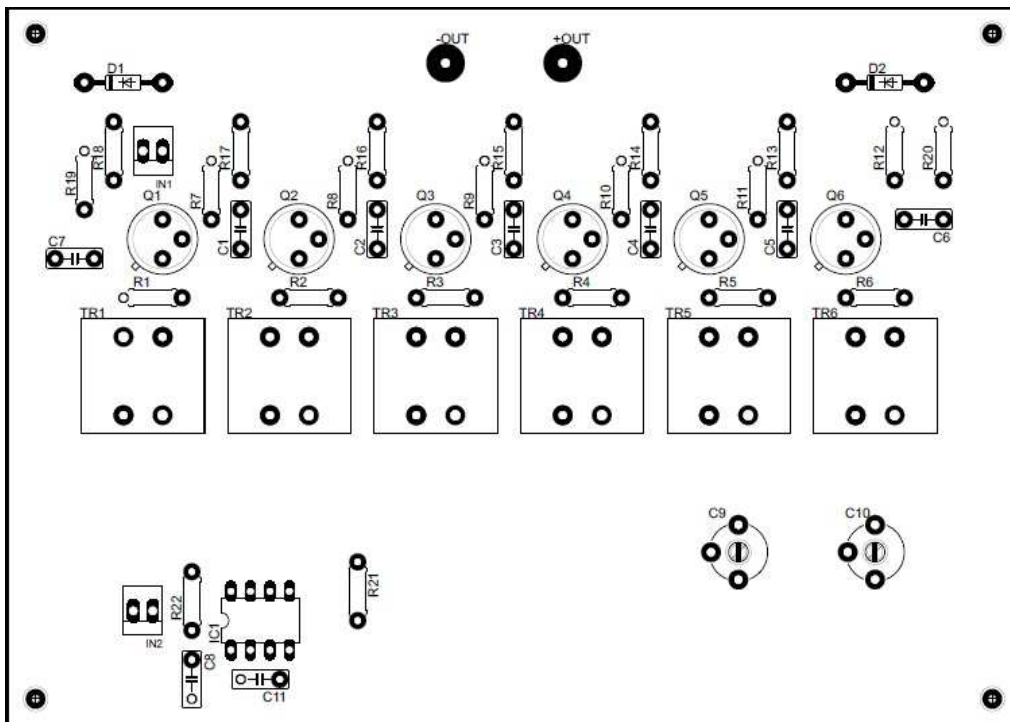
B NÁVRH ZAŘÍZENÍ – PLOŠNÉ SPOJE

Deska plošného spoje – impulsní generátor – bottom

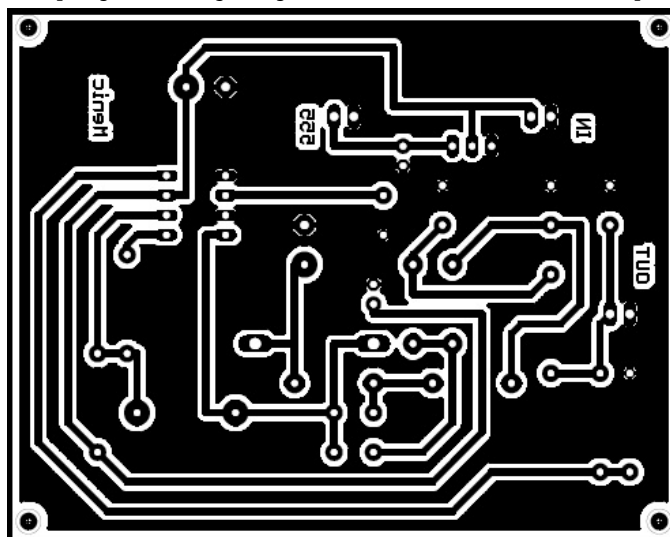


Rozměry desky: 135x95mm, měřítko 1:1

Rozmístění součástek – impulsní generátor – top

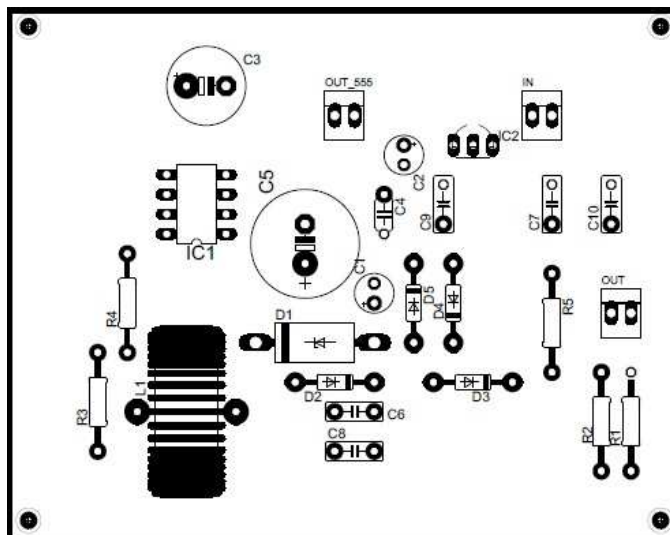


Deska plošného spoje – zvyšující DC-DC měnič napětí – bottom



Rozměry desky: 85x70mm, měřítko 1:1

Rozmístění součástek – zvyšující DC-DC měnič napětí – top



C SEZNAM SOUČÁSTEK

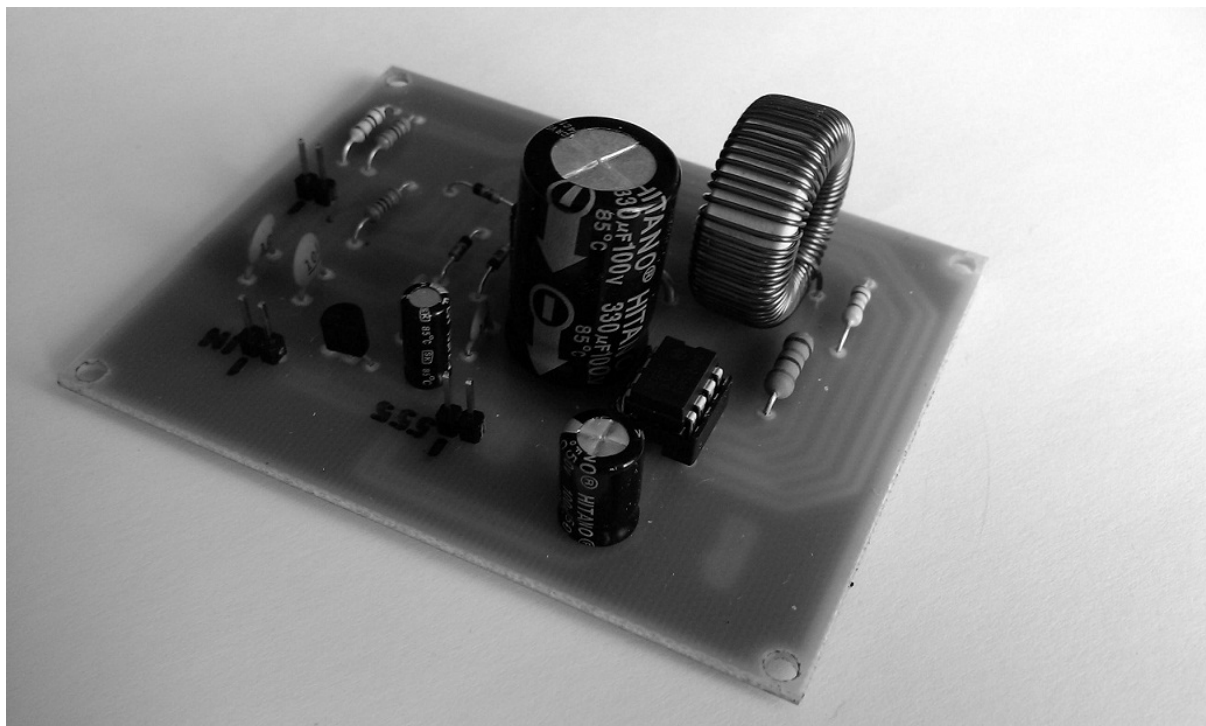
Impulsní generátor			
Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
+OUT	LSP10	LSP10	Pájecí plocha
-OUT	LSP10	LSP10	Pájecí plocha
C1	270pF	C050-025X075	Keramický kondenzátor
C2	270pF	C050-025X075	Keramický kondenzátor
C3	270pF	C050-025X075	Keramický kondenzátor
C4	180pF	C050-025X075	Keramický kondenzátor
C5	270pF	C050-025X075	Keramický kondenzátor
C6	68pF	C050-025X075	Keramický kondenzátor
C7	270pF	C050-025X075	Keramický kondenzátor
C8	50pF	C050-025X075	Keramický kondenzátor
C9	5-65pF	CTRIM808-1	Kapacitní trimr
C10	5-65pF	CTRIM808-1	Kapacitní trimr
C11	10nF	C050-025X075	Keramický kondenzátor
D1	KA222	DO35-10	Křemíková spínací dioda
D2	KA222	DO35-10	Křemíková spínací dioda
IC1	NE555	DIL-08	Časovač
+100V			Napájecí konektor
IN 555			Napájecí konektor
Q1	BSX59	TO39	Spínací tranzistor
Q2	BSX59	TO39	Spínací tranzistor
Q3	BSX59	TO39	Spínací tranzistor
Q4	BSX59	TO39	Spínací tranzistor
Q5	BSX59	TO39	Spínací tranzistor
Q6	BSX59	TO39	Spínací tranzistor
R1	1k	0207/7	Rezistor
R2	1k	0207/7	Rezistor
R3	1k	0207/7	Rezistor
R4	1k	0207/7	Rezistor
R5	1k	0207/7	Rezistor
R6	1k	0207/7	Rezistor
R7	1M	0207/7	Rezistor
R8	100	0207/7	Rezistor
R9	100	0207/7	Rezistor
R10	3k6	0207/7	Rezistor
R11	3k6	0207/7	Rezistor
R12	5k6	0207/7	Rezistor
R13	100k	0207/7	Rezistor
R14	100k	0207/7	Rezistor
R15	100k	0207/7	Rezistor
R16	100k	0207/7	Rezistor
R17	100k	0207/7	Rezistor
R18	100k	0207/7	Rezistor
R19	1k	0207/7	Rezistor
R20	1k	0207/7	Rezistor

R21	100k	0207/7	Rezistor
R22	56k	0207/7	Rezistor
TR1	KBT600/600	RM6	Oddělovací transformátor
TR2	KBT600/600	RM6	Oddělovací transformátor
TR3	KBT600/600	RM6	Oddělovací transformátor
TR4	KBT600/600	RM6	Oddělovací transformátor
TR5	KBT600/600	RM6	Oddělovací transformátor
TR6	KBT600/600	RM6	Oddělovací transformátor

Zvyšující DC-DC měnič napětí			
Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	10 μ	E2,5-5	Elektrolytický kondenzátor
C2	10 μ	E2,5-5	Elektrolytický kondenzátor
C3	100 μ	E5-10,5	Elektrolytický kondenzátor
C4	1n5	C050-024X044	Keramický kondenzátor
C5	330 μ	E5-13	Elektrolytický kondenzátor
C6	100n	C050-025X075	Keramický kondenzátor
C7	100n	C050-025X075	Keramický kondenzátor
C8	100n	C050-025X075	Keramický kondenzátor
C9	100n	C050-025X075	Keramický kondenzátor
C10	100n	C050-025X075	Keramický kondenzátor
D1	SR3100	CB429-15	Schottkyho dioda
D2	1N914-T	DO35-10	Spínací dioda
D3	1N914-T	DO35-10	Spínací dioda
D4	1N914-T	DO35-10	Spínací dioda
D5	1N914-T	DO35-10	Spínací dioda
IC1	MC34063	DIP08	Řídící obvod pro měnič napětí
IC2	HT7130A-1	TO92	Stabilizátor napětí
IN			Napájecí konektor
L	150 μ	STF1030	Toroidní tlumivka
+100V			Napájecí konektor
555			Napájecí konektor
R1	2k	0207/7	Rezistor
R2	150k	0207/7	Rezistor
R3	R22	0207/7	Rezistor
R4	180	0207/7	Rezistor
R5	1k	0207/7	Rezistor

D FOTOGALERIE

Zvyšující DC-DC měnič napětí:



Impulsní generátor:

