

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Přípravek pro měření varikapů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan KŮS**
Osobní číslo: **E12B0059K**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Přípravek pro měření varikapů**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s problematikou varikapů.
2. Navrhněte přípravek pro měření varikapů, který se bude používat při laboratorních cvičeních předmětu KET/SPS.
3. Sestavte měřicí přípravek a proveďte praktická měření.



Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**1. MAŤÁTKO, Jan. Elektronika. 6. vyd., V Idea servis 5., dopl. a upr. vyd.
Praha: Idea servis, 2008, 362 s. ISBN 978-80-85970-64-7.**

2. Internetové zdroje.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Karel Hromadka

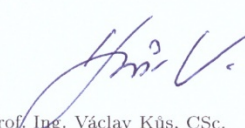
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2015**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Anotace

Předkládaná bakalářská práce se zabývá kapacitními diodami. Popisuje princip jejich funkce, základní parametry a různé způsoby měření. Vybrané měřicí metody jsou nejprve otestovány v laboratoři a následně prakticky realizovány, ve formě přípravků, pro studenty Elektrotechnické fakulty v Plzni.

Klíčová slova

Kapacitní dioda, varikap, PN přechod, měřicí přípravek.

Abstract

The bachelor thesis is focused on capacitance diodes. It describes the principle of their operation, basic parameters and various ways of measuring. Selected measuring methods are first tested in the laboratory and then practically realized in the form of a device for students of the Faculty of Electrical Engineering in Pilsen.

Key words

Capacitance diode, varicap, PN junction, device for measuring.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

Jan Kůs

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Karlovi Hromadkovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

Obsah.....	8
Úvod.....	9
Seznam symbolů a zkratek.....	10
1 Polovodičové přechody.....	13
1.1 PN přechod v rovnovážném stavu.....	13
1.2 PN přechod s přiloženým napětím.....	14
1.3 Kapacita PN přechodu.....	16
2 Kapacitní diody.....	18
3 Způsoby měření kapacitních diod.....	23
3.1 Měření ampérmetrem a voltmetrem – Ohmova metoda.....	23
3.2 Měření kapacitních diod rezonanční metodou.....	24
3.3 Měření kapacitních diod srovnávací metodou.....	26
3.4 Měření kapacitních diod můstkovou metodou.....	27
3.5 Měření kapacitních diod substituční metodou.....	30
3.6 Měření kapacitních diod pomocí Clappova oscilátoru.....	30
4 Praktické ověření měřících metod.....	32
4.1 Ohmova metoda.....	32
4.2 Rezonanční metoda.....	36
4.3 Měření kapacity pomocí Clappova oscilátoru.....	39
5 Realizace přípravku na měření varikapů.....	42
Závěr.....	45
Seznam literatury.....	46
Příloha – Návrh měřící úlohy pro studenty.....	47

Úvod

Předkládaná bakalářská práce vznikla z důvodu potřeby nového přípravku na měření kapacitních diod neboli varikapů pro laboratorní cvičení předmětu KET/SPS, vyučovaném na Fakultě elektrotechnické v Plzni. Práce se zabývá kapacitními diodami a principem jejich funkce, metodami měření a praktickým ověřením vybraných měřících metod a následnou praktickou realizaci měřícího přípravku pro studenty.

Kapacitní diody jsou elektronické součástky využívající bariérovou kapacitu PN přechodu. Tato kapacita převládá v závěrném směru, kdy různou velikostí přivedeného závěrného napětí řídíme šířku depletiční oblasti a tedy výslednou kapacitu. Využívány jsou jako laditelné kondenzátory, vyznačujícím se vynikajícím ztrátovým úhlem $\text{tg } \delta$.

Kapacitu varikapů lze měřit podobně jako kapacitu kondenzátorů. V předložené práci jsou popsány metody: Ohmova, rezonanční, substituční, srovnávací, můstková a metoda s využitím Clappova oscilátoru. Pro praktické ověření byly vybrány metody Ohmova, rezonanční a metoda s využitím Clappova oscilátoru. Tyto způsoby měření byly také realizovány ve formě přípravků, sloužící pro praktickou výuku studentů. Vytvořeno bylo také zadání měřících úloh a postup měření.

Seznam zkratk a symbolů

A [m^2]	.....	Plocha průřezu polovodiče
C_1 [F]	.....	Kondenzátor oddělující stejnosměrnou složku napětí
C_j [F]	.....	Kapacita PN přechodu
C_M [F]	.....	Kapacita montáže
C_N [F]	.....	Normálová kapacita
C_P [F]	.....	Kapacita pouzdra
C_R [-]	.....	Poměr kapacit
C_t [F]	.....	Celková kapacita varikapu
C_{t0} [F]	.....	Celková kapacita varikapu při nulovém napětí
C_{U1} [F]	.....	Kapacita varikapu při napětí U_1
C_{U2} [F]	.....	Kapacita varikapu při napětí U_2
E_D [Vm^{-1}]	.....	Intenzita elektrického pole vytvořená prostorovým nábojem
E_{VN} [Vm^{-1}]	.....	Intenzita vnějšího elektrického pole
f [Hz]	.....	Kmitočet
f_0 [Hz]	.....	Kmitočet s nejnižším ztrátovým úhlem $tg \delta$
f_{GEN} [Hz]	.....	Frekvence generátoru
f_{LNR} [Hz]	.....	Rezonanční kmitočet normálové cívky
f_{max} [Hz]	.....	Maximální kmitočet použití
f_{min} [Hz]	.....	Minimální kmitočet použití
f_R [Hz]	.....	Rezonanční kmitočet
I [A]	.....	Proud
I_{CN} [A]	.....	Proud procházející normálovým kapacitorem
I_{CV} [A]	.....	Proud procházející varikapem
I_{SN} [A]	.....	Proud procházející přes R_{SN}
L_1 [H]	.....	Indukčnost cívky
L_N [H]	.....	Normálová indukčnost
L'_N [H]	.....	Fiktivní indukčnost
m [-]	.....	Koeficient charakterizující počet příměsí
n [-]	.....	Exponent strmosti PN přechodu

N_D [-]	Počet příměsí v polovodiči N
N_A [-]	Počet příměsí v polovodiči P
N_0 [-]	Počet příměsí v polovodiči
q [C]	Absolutní hodnota náboje elektronu
Q [-]	Činitel jakosti
Q_{nf} [-]	Činitel jakosti pro $f < f_0$
Q_N [C]	Kladný prostorový náboj
Q_P [C]	Záporný prostorový náboj
Q_{vf} [-]	Činitel jakosti pro $f > f_0$
R_j [Ω]	Odpor PN přechodu
R_s [Ω]	Sériový odpor polovodičových materiálů a ohmických kontaktů
R_{SN} [Ω]	Snímací rezistor
R_{var} [Ω]	Rezistor pro úpravu vnitřního odporu
U_D [V]	Difuzní napětí
x_n [m]	Šířka depletiční oblasti na straně N
x_p [m]	Šířka depletiční oblasti na straně P
X [m]	Vzdálenost od přechodu PN
$\text{tg } \delta$ [-]	Ztrátový úhel
T [K]	Teplota
T_{KC} [K^{-1}]	Teplotní součinitel
U [V]	Napětí
U_{BR} [V]	Průrazné napětí
U_{CT} [V]	Napětí na varikapu
U_{GEN} [V]	Efektivní hodnota napětí generátoru
U_{SN} [V]	Napětí na R_{SN}
U_{SS} [V]	Předpětí pro varikap
X_C [Ω]	Kapacitní reaktance
X_L [Ω]	Induktivní reaktance
Z_2, Z_3, Z_4 [Ω]	Nastavitelné impedance
Z_{var} [Ω]	Impedance náhradního schématu varikapu
Z_X [Ω]	Neznámá impedance

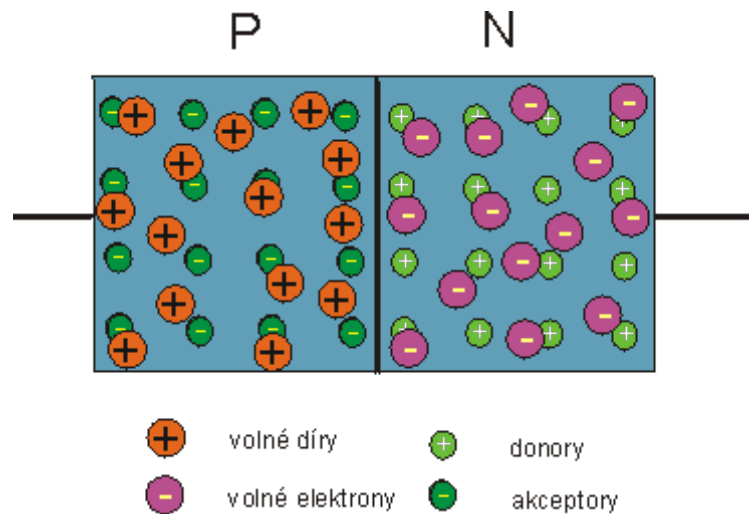
τ_{rel} [s].....	Relaxační doba přemístování nosičů náboje
ε [Fm ⁻¹].....	Permitivita
ε_0 [Fm ⁻¹].....	Permitivita vakua
ε_s [-]	Relativní permitivita polovodiče
ρ [Ω m]	Měrný odpor polovodiče
$\varphi_x, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ [rad].....	Fázové úhly
ω [s ⁻¹].....	Úhlová frekvence

1 Polovodičové přechody

Polovodičový přechod je rozhraní mezi různě dotovanými polovodiči, mezi různými typy polovodičů nebo mezi polovodičem a jiným materiálem. Přechody, které mají na obou stranách stejnorodé materiály, ale různě dotované příměsemi, nazýváme PN přechody. Dotování příměsemi je prováděno trojmocnými prvky, např. arsen, pro vznik polovodiče typu P a pětímocnými prvky, např. galium, pro vznik polovodiče typu N. [2]

1.1 PN přechod v rovnovážném stavu

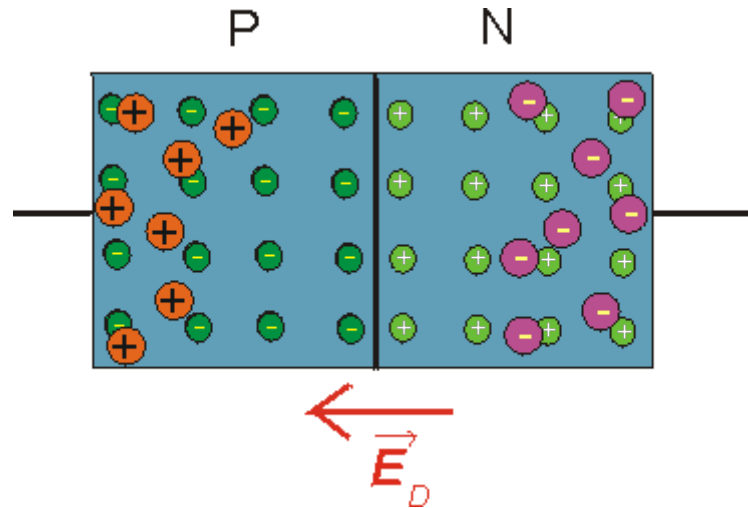
V okamžiku vytvoření PN přechodu vypadá situace rozložení nosičů elektrického náboje dle obr.1.1. Volné díry v oblasti P nazýváme majoritními nosiči elektrického náboje a v oblasti N, minoritními nosiči elektrického náboje. Volné elektrony nazýváme majoritními nosiči elektrického náboje v oblasti N a minoritními nosiči elektrického náboje v oblasti P.



Obr. 1.1 Situace na PN přechodu v okamžiku jeho vytvoření. [6]

V místě metalurgického spojení však dochází k prudké změně koncentrace příměsí u obou polovodičů P a N. Volné díry, na straně P, difundují k místu přechodu a zanechávají za sebou záporný prostorový náboj Q_P . Zároveň volné elektrony, na straně N, difundují k místu přechodu a zanechávají za sebou kladný prostorový náboj Q_N . V místě přechodu spolu volné díry a volné elektrony rekombinují. Nově vzniklý záporný prostorový náboj Q_P začíná odpuzovat volné elektrony, difundující ze strany N a zároveň kladný prostorový náboj Q_N odpuzuje volné díry difundující ze strany P. V místě přechodu tedy nastane rovnováha mezi difúzními silami a

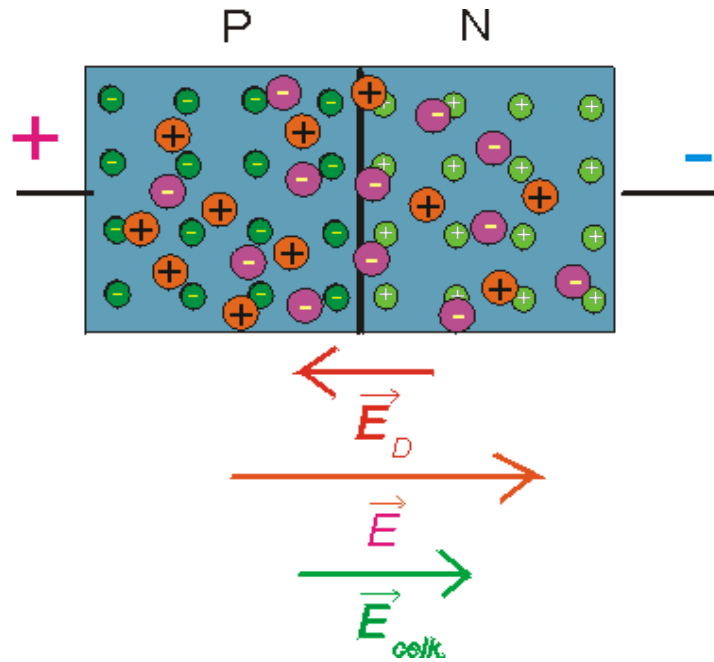
driftovými silami elektrického pole E_D , vytvořeného prostorovým nábojem. V důsledku elektrického pole E_D vznikne v oblasti přechodu tzv. kontaktní potenciál, nazýván také difúzní napětí U_D . Oblast, kde se nenachází žádné volné nosiče elektrického náboje, je nazývána vyprázdněná, nebo depletiční. [2, 6]



Obr. 1.2 PN přechod v rovnovážném stavu. [6]

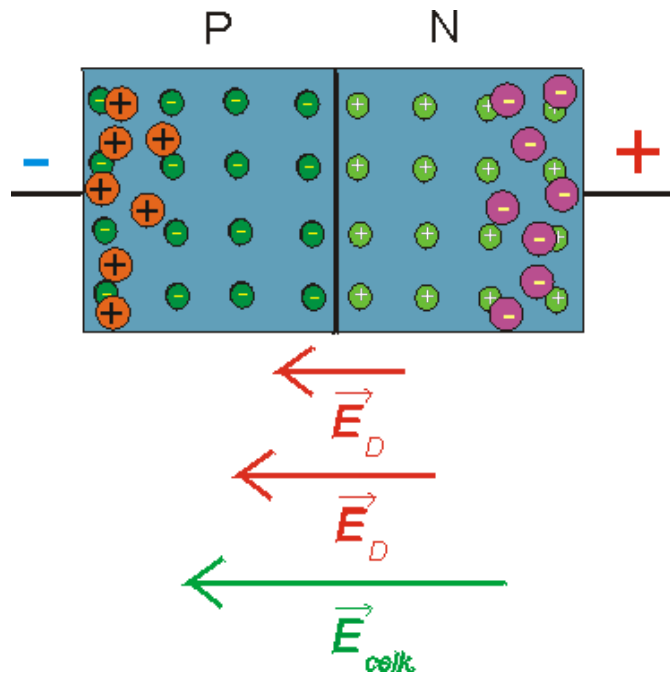
1.2 PN přechod s přiloženým napětím

Přiložené napětí na PN přechod lze polarizovat v propustném a závěrném směru. V případě přiložení napětí v propustném směru se zmenšuje šířka depletiční oblasti. V případě, že intenzita přiloženého elektrického pole E_{VN} je větší, než intenzita elektrického pole E_D , depletiční oblast zanikne a volné elektrony ze strany N difundují na stranu P, kde zvyšují koncentraci minoritních nosičů a zároveň volné díry ze strany P difundují na stranu N. Přes přechod PN začíná tedy protékat elektrický proud.



Obr. 1.3 PN přechod v propustném směru. [6]

V případě přiložení napětí v závěrném směru se šířka depletiční oblasti ještě zvětšuje. Intenzita přiloženého elektrického pole se tedy přičítá k intenzitě elektrického pole E_D . Nosiče volného elektrického náboje nemohou difundovat a proud polovodičem neprochází. [2, 6]



Obr. 1.4 PN přechod v závěrném směru. [6]

1.3 Kapacita PN přechodu

U PN přechodu rozlišujeme difúzní kapacitu a bariérovou kapacitu. Difúzní kapacita je vytvořena akumulací náboje v důsledku průchodu proudu a převažuje v propustném směru. Bariérová kapacita je vytvořena dvojrůstvou prostorového náboje v depletiční vrstvě a převažuje v závěrném směru. Jde o důležitou vlastnost PN přechodu, která do značné míry omezuje použití dané součástky při střídavém signálu vysokých frekvencí. V některých aplikacích této vlastnosti využíváme, např. kapacitní dioda, kde využíváme bariérové kapacity PN přechodu. Při jejím odvození se vychází z obecné definice kapacity: [1, 2]

$$C_j = \frac{dQ}{dU}, \quad (1.1)$$

kde C_j je kapacita PN přechodu, dQ je změna akumulovaného náboje a dU je změna napětí. Prostorový náboj na obou stranách přechodu lze spočítat z rovnice:

$$|Q| = q * A * x_n * N_D = q * A * x_p * N_A, \quad (1.2)$$

kde q je absolutní hodnota náboje elektronu, A je plocha průřezu polovodiče, x_n je šířka depletiční oblasti na straně N, x_p je šířka depletiční oblasti na straně P a N_D a N_A je počet příměsí v polovodiči. Šířka depletiční oblasti, na straně N, lze vypočítat z rovnice:

$$x_n = \left[\frac{2 * \varepsilon}{q} * (U_D - U) * \frac{N_A}{N_D * (N_A + N_D)} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1.3)$$

na straně P z rovnice:

$$x_p = \left[\frac{2 * \varepsilon}{q} * (U_D - U) * \frac{N_D}{N_A * (N_A + N_D)} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1.4)$$

kde ε je permitivita polovodiče, U_D je difúzní napětí a U je přiložené napětí. Po dosazení rovnic (1.3 a 1.4) do rovnice (1.2) a matematických úpravách lze dostat rovnici:

$$|Q| = q * A \left[\frac{2 * \varepsilon}{q} * (U_D - U) * \frac{N_D * N_A}{(N_A + N_D)} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1.5)$$

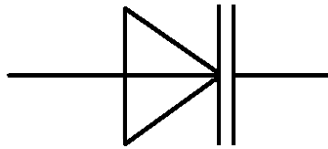
ze které lze derivací podle napětí (1.1) a matematických úpravách dostat vztah pro výpočet bariérové kapacity:

$$C_j = \varepsilon * A \left[\frac{q}{2 * \varepsilon} * \frac{1}{(U_D - U)} * \frac{N_D * N_A}{(N_A + N_D)} \right] = C_{j0} * \left(1 - \frac{U}{U_d} \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (1.6)$$

kde C_{j0} je bariérová kapacita PN přechodu bez přiloženého vstupního napětí. [2]

2 Kapacitní diody

Kapacitní diody jsou součástky, které využívají proměnnou kapacitu depletiční oblasti v závislosti na velikosti přivedeného závěrného napětí, nebo kapacitu struktury MIS. Nejčastěji se vyrábějí s jedním PN přechodem. Využíváme jejich vlastností v závěrném směru. Změnou velikosti závěrného napětí řídíme šířku depletiční oblasti a tím také výslednou kapacitu PN přechodu. Výhodou jsou vlastnosti jako velmi malý ztrátový úhel $tg \delta$, velmi malý sériový odpor R_s , malá teplotní závislost, malý šum, kmitočtová nezávislost až do oblasti milimetrových vln. Jejich voltampérová charakteristika je stejná jako u běžné křemíkové diody. [1]



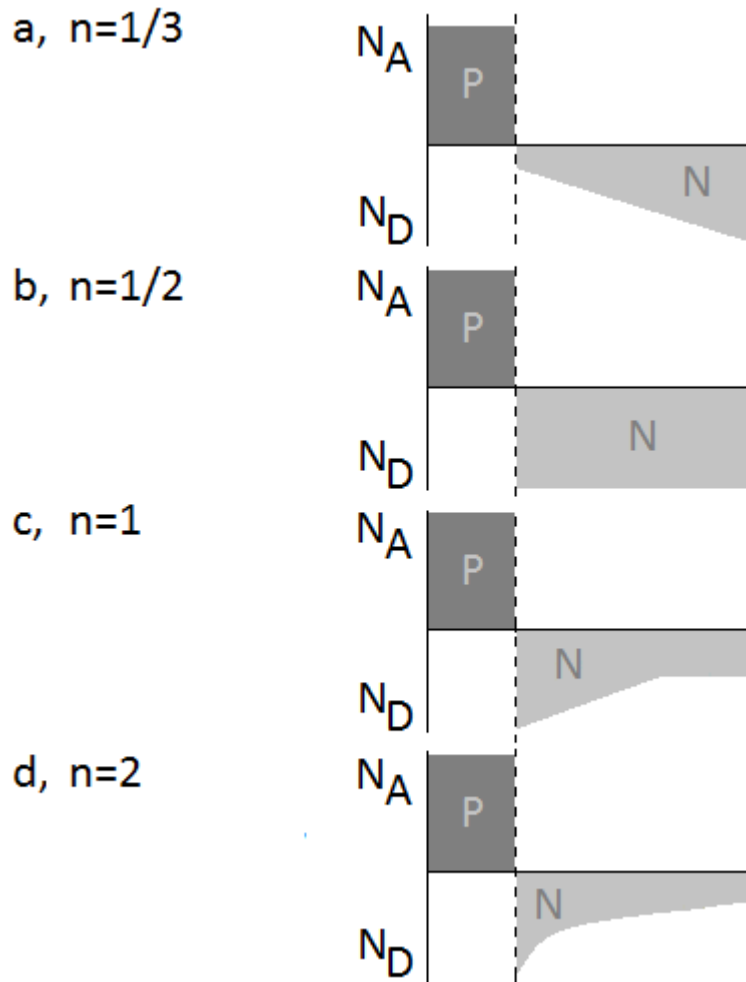
Obr. 2.1 Schématická značka kapacitní diody.

Kapacitní diody můžeme ještě rozdělit na varikapy z anglického variable capacitor a na varaktory z anglického variable reactor. Jejich rozdíl spočívá v jejich odlišné aplikaci a způsobu řízení velikosti kapacity. Kapacita varikapu je řízena velikostí stejnosměrného napětí přivedeného v závěrném směru. Přivedené střídavé napětí již není veliké a neovlivní nám výslednou kapacitu. U varaktoru je situace opačná, stejnosměrné napětí se obvykle nepřivádí, ale velikost přivedeného střídavého napětí je dostatečně veliká. Varaktor se tak chová jako nelineární kondenzátor. [1]

Závislost bariérové kapacity PN přechodu na přiloženém závěrném napětí vyjádříme pomocí vztahu:

$$C_t = C_{t0} * \left(1 - \frac{U}{U_d}\right)^{-n}, \quad (2.1)$$

kde C_{t0} je kapacita varikapu při nulovém napětí, U je přivedené závěrné napětí, U_d je difúzní napětí a n je exponent, jehož hodnota závisí na tvaru PN přechodu. Kapacitní diody se vyrábějí s pozvolnými přechody, kde exponent ve vzorci (2.1) je $n = 1/3$. Strmými přechody, kde $n = 1/2$ a v aplikacích, kde je potřeba velká změna kapacity při dané změně napětí s tzv. hyperstrmými přechody, kde $n = 1$, nebo $n = 2$. [1, 2]



Obr. 2.2 Závislost tvaru přechodu na hodnotě koeficientu n : a) lineární, b) strmý, c) a d) hyperstrmý.

Tvar přechodu a tedy závislost koncentrace příměsových atomů na vzdálenosti od přechodu, můžeme popsat vztahem:

$$N_D(x) = N_0 * x^m, \text{ kde } x > 0, \quad (2.2)$$

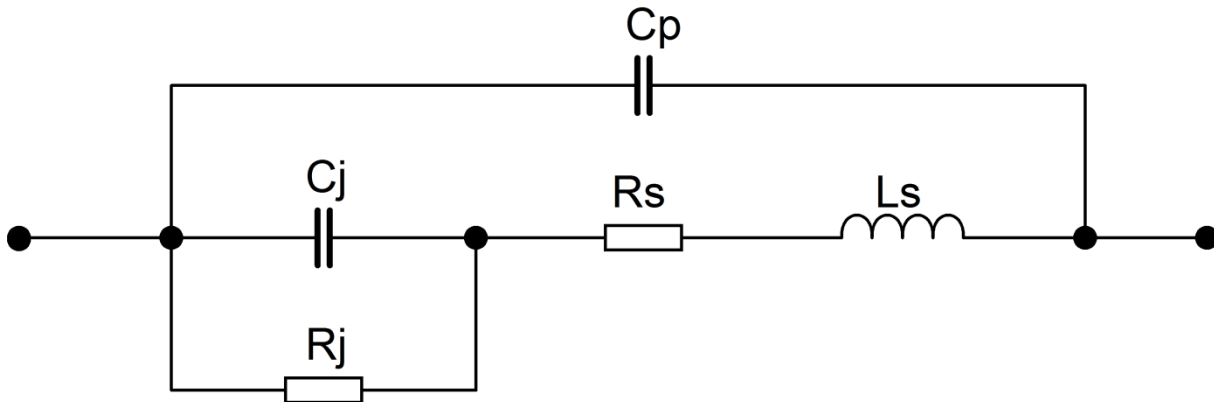
kde N_0 je koncentrace příměsových atomů v oblasti metalurgického PN přechodu. X je vzdálenost od přechodu a m je koeficient charakterizující množství koncentrací příměsových atomů. Pro hyperstrmý přechod je $m < 0$, pro strmý přechod je $m = 0$ a pro pozvolný je $m = 1$. [1]

Změna kapacity PN přechodu, tedy změna šířky depletiční oblasti, souvisí také s přemísťováním majoritních nosičů a jejich rychlosti přemístění. Pro změnu kapacity a tedy rozšíření nebo zúžení na PN přechodu je nutno přivést, resp. odvést část děr pro oblast P a část elektronů pro oblast N. Tyto změny jsou časově omezeny relaxační dobou přemísťování nosičů, která je dána vztahem:

$$\tau_{rel} = \varepsilon_s * \varepsilon_0 * \rho , \quad (2.3)$$

kde, ε_s je permitivita polovodiče, ε_0 je permitivita vakua a ρ je měrný odpor polovodiče. Pro materiály germanium, křemík a arzenid galia je relaxační doba řádově 10^{-13} s, takže omezení relaxační dobou bude znatelné až při značně vysokých kmitočtech. [1]

Jeden z nejdůležitějších parametrů u varikapu je činitel jakosti Q , tj. převrácená hodnota ztrátového úhlu $tg \delta$, který spočteme jako poměr reálné a imaginární složky impedance. Pro jeho odvození je důležité náhradní schéma varikapu.



Obr. 2.3 Náhradní schéma zapouzdřeného varikapu.

Odpor R_j je odpor PN přechodu a jeho hodnota je $10^2 \Omega$ až $10^8 \Omega$. Odpor R_s je sériový odpor polovodičových materiálů a ohmických kontaktů. Jeho hodnota je řádově desetiny, nebo jednotky Ω . Kapacita C_j je kapacita PN přechodu a její hodnota je 10^{-13} F až 10^{-7} F. C_p je kapacita pouzdra a L_s je indukčnost přívodů. Kapacita C_p a indukčnost L_s obvykle zanedbáváme. A tedy po zanedbání L_s a C_p dostaneme impedanci: [1]

$$Z_{var} = \frac{R_j * \frac{1}{j\omega C_j}}{R_j + \frac{1}{j\omega C_j}} + R_s, \quad (2.4)$$

kterou po matematických úpravách rozdělíme na reálnou a imaginární část a jejich poměrem dostaneme ztrátový úhel $tg \delta$:

$$tg \delta = 2 * \pi * f * R_s * C_j + \frac{R_j + R_s}{2 * \pi * f * R_j^2 * C_j} \quad (2.5)$$

a následně činitel jakosti Q :

$$Q = \frac{1}{tg \delta}. \quad (2.6)$$

Derivací vztahu (2.5) lze určit kmitočet, při kterém je ztrátový úhel nejmenší tj.:

$$f_0 = \frac{1}{2 * \pi * C_j} * \sqrt{\frac{1}{R_s * R_j} + \frac{1}{R_j^2}} \approx \frac{1}{2 * \pi * C_j * \sqrt{R_s * R_j}}. \quad (2.7)$$

Pro nižší kmitočty než f_0 je možné zanedbat sériový odpor R_s a činitel jakosti Q bude:

$$Q_{nf} = 2 * \pi * f * C_j * R_j. \quad (2.8)$$

Pro vyšší kmitočty lze zanedbat odpor R_j a činitel jakosti Q bude:

$$Q_{vf} = \frac{1}{2 * \pi * f * C_j * R_s}. \quad (2.9)$$

Kmitočtový rozsah varikapu lze určit z podmínky $Q = 1$ a tedy:

$$Q_{nf} = 1 = 2 * \pi * f * C_j * R_j \rightarrow f_{min} = \frac{1}{2 * \pi * C_j * R_j}, \quad (2.10)$$

$$Q_{vf} = 1 = \frac{1}{2 * \pi * f * C_j * R_s} \rightarrow f_{max} = \frac{1}{2 * \pi * C_j * R_s}. \quad (2.11)$$

Mezi další důležité parametry kapacitních diod patří kapacita PN přechodu C_j , při předem definované velikosti připojeného závěrného napětí. Ta je však často označena jako C_t a udává celkovou kapacitu. Je zde započtena také kapacita pouzdra C_P a tzv. kapacita montáže C_M . Dále průrazné napětí U_{BR} , které určuje maximální hodnotu napětí v závěrném směru. Neméně důležitým parametrem je poměr kapacit C_R . Tento poměr udává, kolikrát se změní kapacita kapacitní diody při změně z prvního předem definovaného napětí na druhé předem definované napětí. Tento poměr nazýváme koeficient překrytí nebo také kapacitní zdvih. Jeho hodnoty se pohybují v závislosti na tvaru přechodu a lze jej vyjádřit jako:

$$C_R = \frac{C_{U1}}{C_{U2}}, \quad (2.12)$$

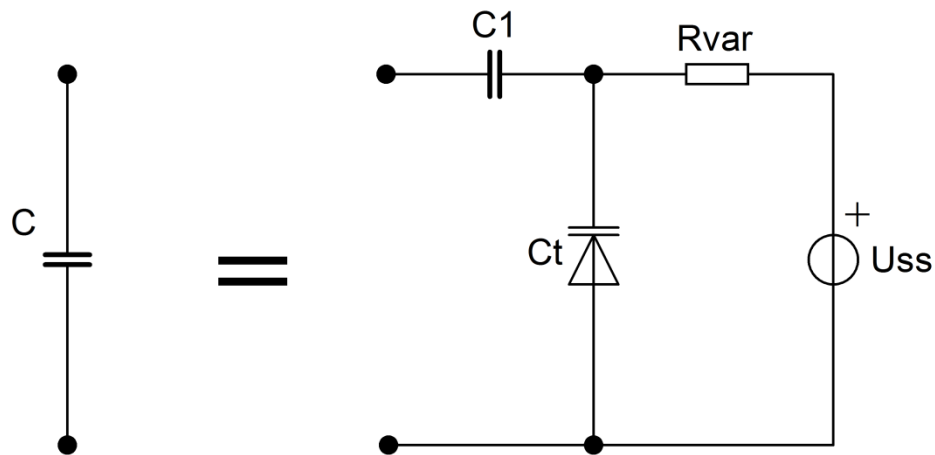
kde C_R je poměr kapacit, C_{U1} je kapacita při závěrném napětí U_1 a C_{U2} je kapacita při závěrném napětí U_2 . Dalším parametrem je teplotní součinitel T_{KC} kapacity C_j , při definované velikosti závěrného napětí a kmitočtu a lze obecně napsat:

$$T_{KC} = \frac{1}{C_j} * \frac{\partial C_j}{\partial T} * 10^6. \quad (2.13)$$

V praxi se s kapacitními diodami setkáme v laděných oscilátorech, kmitočtových modulátorech, filtrech, generátorech harmonických signálů a pod.. Jejich výhoda spočívá ve zvýšení spolehlivosti elektronického zařízení a jeho miniaturizaci. [1, 2]

3 Způsoby měření kapacitních diod

Metody pro měření kapacitních diod jsou velmi podobné jako měření kondenzátorů. Ovšem při měření varikapu je potřeba oddělit stejnosměrnou část napětí, tedy zdroj stejnosměrného napětí, který je nezbytný pro nastavení požadované kapacity, od nastavovaného obvodu. Zároveň je nutné zajistit, aby tato nastavovací část neovlivňovala námi měřený obvod. Tyto vlastnosti nám zajistí kondenzátor C_1 , který stejnosměrně odděluje části obvodu a musí platit $C_1 \gg C_t$ a rezistor R_{VAR} , který značně zvýší vnitřní impedanci zdroje ss napětí. [1]



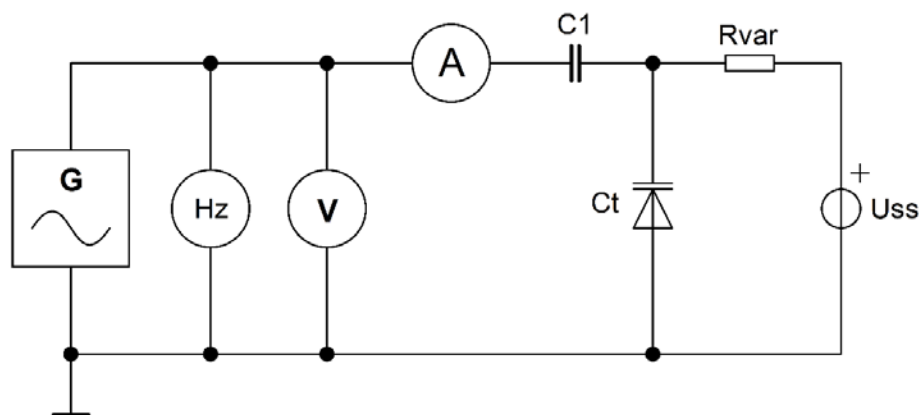
Obr. 3.1 Základní schéma zapojení varikapu pro možnost změny jeho kapacity.

3.1 Měření kapacitních diod ampérmetrem a voltmetrem – Ohmova metoda

Měření je založeno na podobném principu jako Ohmova metoda měření odporů, kde vycházíme z Ohmova zákona. Pro měření kapacitních diod vyjdeme tedy ze vztahu:

$$Z_c = \frac{U}{I} = X_c = \frac{1}{2 * \pi * f * C_t} \rightarrow C_t = \frac{I}{2 * \pi * f * U}, \quad (3.1)$$

kde Z_c je impedance, X_c je kapacitní reaktance, f je kmitočet, U je napětí, I je proud a C_t je výsledná kapacita. Tato metoda je vhodná pro použití, kde činitel jakosti je minimálně 100. Princip měřící metody je na obr. 3.2. [3, 4]

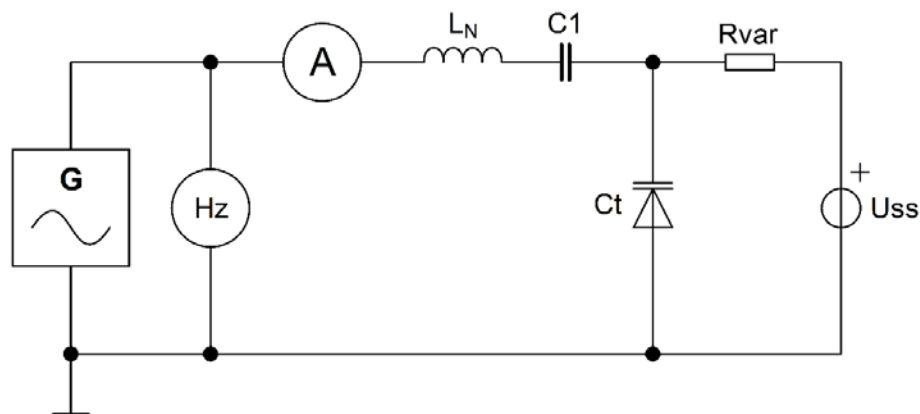


Obr. 3.2 Schéma zapojení měření varikapu Ohmovo metodou.

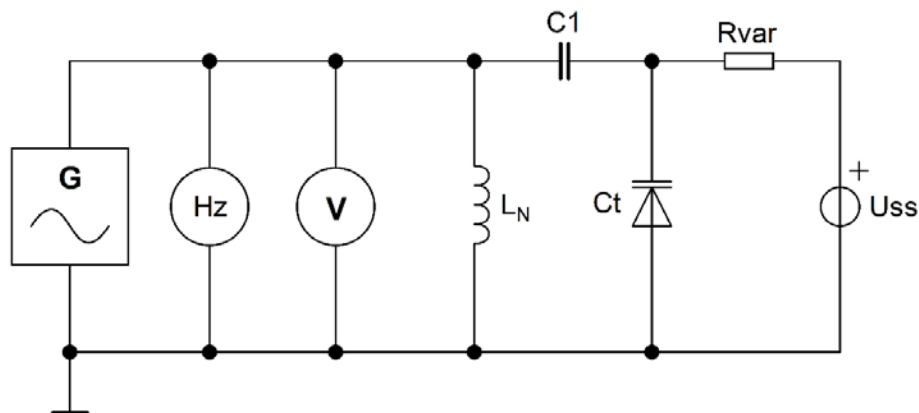
3.2 Měření kapacitních diod rezonanční metodou

Tato metoda je založena na principu rezonance elektrického obvodu. Můžeme využít sériové rezonance elektrického obvodu, kde hledáme maximální hodnotu protékajícího proudu. Nebo využít paralelní rezonance elektrického obvodu, kde hledáme maximální hodnotu napětí na rezonančním obvodu. Lze také využít dvě modifikace zapojení, podle toho zda je k dispozici normálová kapacita, nebo normálová indukčnost. [3, 4]

Princip měření pro modifikaci s normálovou indukčností je na obr. 3.3 a 3.4. [4, 5]



Obr. 3.3 Zapojení pro měření pomocí sériové rezonance s normálovou indukčností.



Obr. 3.4 Zapojení pro měření pomocí paralelní rezonance s normálovou indukčností.

Vydeme z obecné podmínky rezonance:

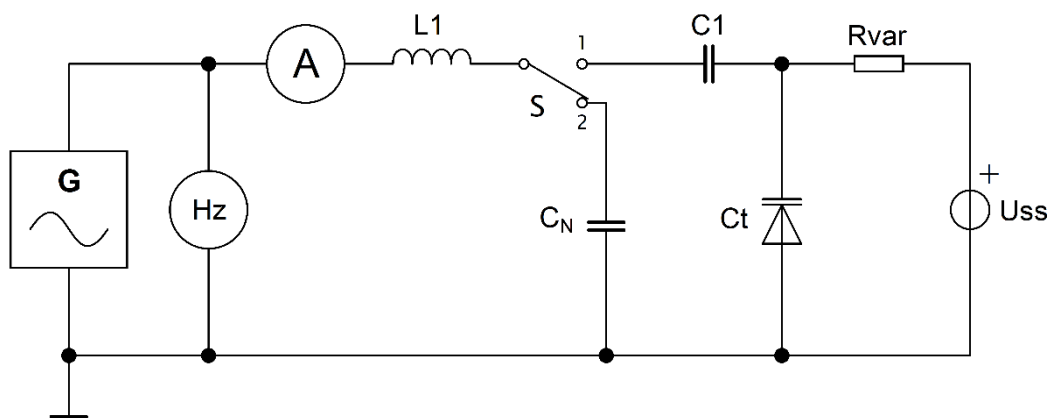
$$X_C = X_L \rightarrow \frac{1}{2 * \pi * f_R * C_t} = 2 * \pi * f_R * L_N, \quad (3.2)$$

kde po matematických úpravách při použití normálové indukčnosti dostaneme:

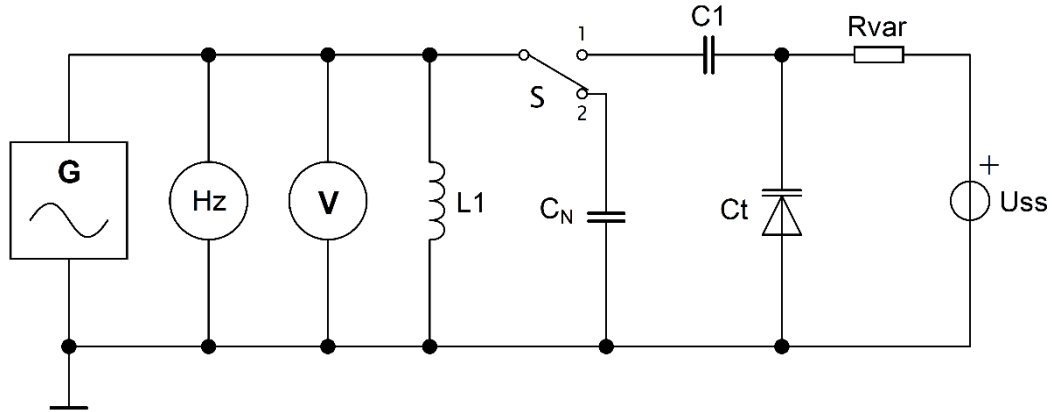
$$C_t = \frac{1}{(2 * \pi * f_R)^2 * L_N}, \quad (3.3)$$

kde C_t je kapacita kapacitní dioda, L_N je normálová indukčnost a f_R je rezonanční kmitočet.

Princip měření pro modifikaci s normálovou kapacitou je obr. 3.5 a 3.6.



Obr. 3.5 Zapojení pro měření pomocí sériové rezonance s normálovou kapacitou.



Obr. 3.6 Zapojení pro měření pomocí paralelní rezonance s normálovou kapacitou.

Také v tomto zapojení vyjdeme ze stejné podmínky rezonance jako u normálové indukčnosti a můžeme tedy napsat:

$$C_N = \frac{1}{(2 * \pi * f_N)^2 * L_1}, \quad (3.4)$$

$$C_t = \frac{1}{(2 * \pi * f_R)^2 * L_1}, \quad (3.5)$$

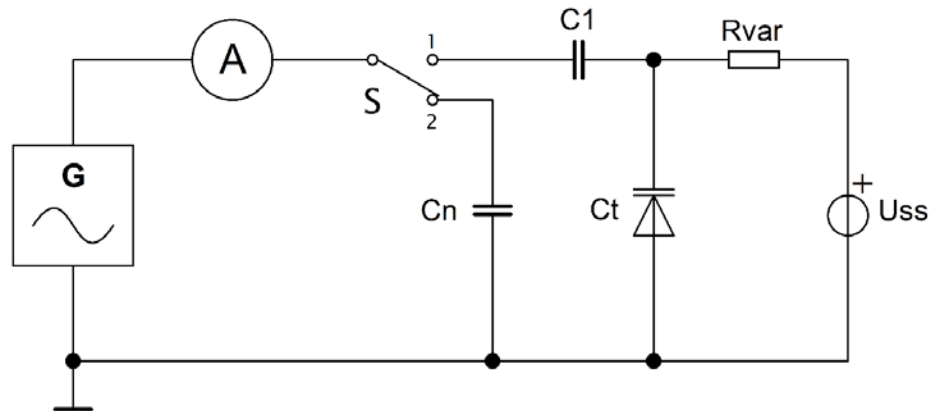
kde C_N je kapacita normálového kondenzátoru, C_t je kapacita měřeného varikapu, f_N je rezonanční kmitočet pro normálový kondenzátor a f_V je rezonanční kmitočet měřeného varikapu. Z rovnice (3.4) vyjádříme L_1 a dosadíme do rovnice (3.5) a po matematických úpravách dostaneme výsledný vztah pro výpočet kapacity varikapu: [5]

$$C_t = C_N * \frac{f_N^2}{f_R^2}. \quad (3.6)$$

3.3 Měření kapacitních diod srovnávací metodou

Tato metoda je založena na Kirchhoffových zákonech. Do měřicího obvodu je zapojen kondenzátor se známou kapacitou a měřený varikap. Měření lze provést na sériově zapojeném kondenzátoru a varikapu, kdy měříme napětí na obou součástkách. Nebo na paralelně zapojeném

normálovém kondenzátoru a varikapu, kdy měříme protékající proud. Princip měření je na obr. 3.7. [3, 5, 7]



Obr. 3.7 Zapojení pro měření kapacitních diod srovnávací metodou.

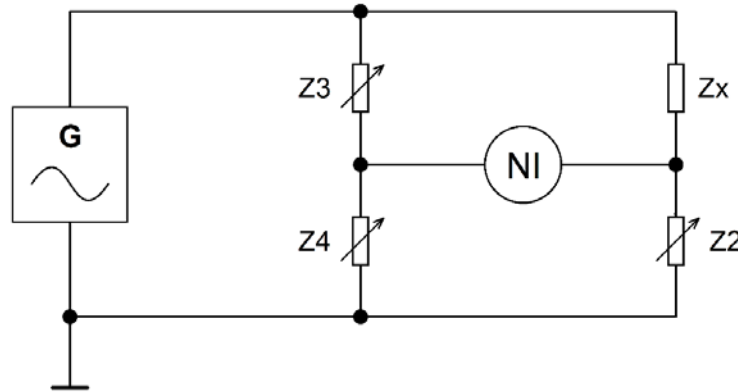
Vyjdeme-li z podmínky nepřímé úměrnosti mezi velikostí protékajícího proudu a kapacitní reaktance, při uvažování ideálního varikapu, dostaneme vztah:

$$\frac{I_{CT}}{I_{CN}} = \frac{X_{CN}}{X_{CT}} = \frac{1}{\frac{2 * \pi * f * C_N}{1}} = \frac{C_T}{C_N} \rightarrow C_T = C_N * \frac{I_{CV}}{I_{CN}}, \quad (3.7)$$

kde I_{CV} je proud kapacitní diodou, I_{CN} je proud normálovým kapacitorem, C_N je normálová kapacita, C_T je kapacita měřeného varikapu a X_{CN} a X_{CT} jsou jejich impedance. [3, 5, 7]

3.4 Měření kapacitních diod můstkovou metodou

Tato metoda je založena na co nejpřesnějším nastavení vyvážení můstku. Můstek je obecně složen ze čtyř impedancí a nulového indikátoru. Tři impedance jsou známé a alespoň dvě jsou proměnné. Vyvážení můstku znamená nastavení proměnných impedancí na takové hodnoty, aby byla výchylka nulová. [3]



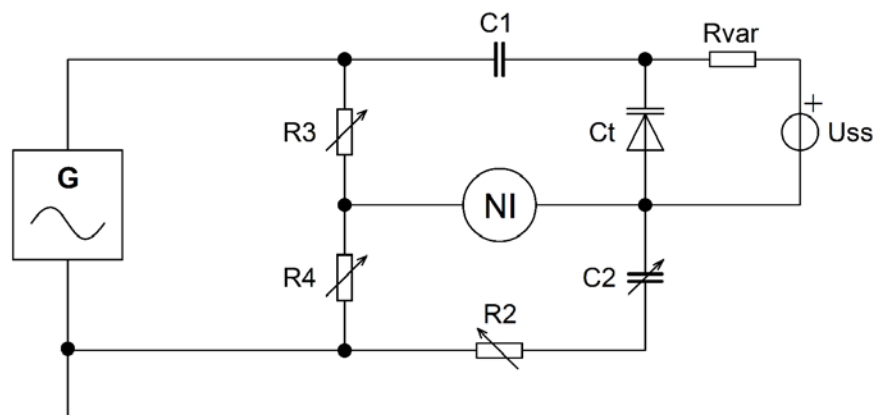
Obr. 3.8 Obecné zapojení Wheatstonova můstku.

Pro obecný můstek musí být splněny dvě základní podmínky:

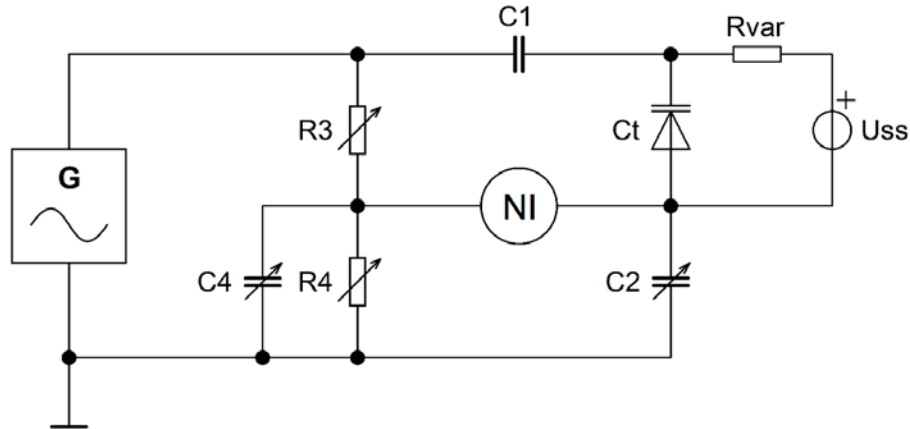
$$Z_X * Z_4 = Z_2 * Z_3 , \quad (3.8)$$

$$\varphi_X + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3 , \quad (3.9)$$

kde Z_X je neznámá impedance, Z_2, Z_3, Z_4 jsou nastavitelné impedance, $\varphi_X, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ jsou jejich fázové úhly a NI je nulový indikátor. Z těchto vztahů lze usoudit, že pro vyvážení střídavého můstku je nutno splnit obě tyto podmínky. Pro měření je tedy potřeba možnost nastavení nejen velikosti požadované impedance, ale také možnost nastavení fázového úhlu. To splňuje Wienův můstek, nebo Scheringův můstek. [3, 7]



Obr. 3.9 Schéma zapojení Wienova můstku.



Obr. 3.10 Schéma zapojení Scheringova můstku.

Výsledný vztah pro výpočet kapacity varikapu je u obou zapojení:

$$C_T = C_2 * \frac{R_4}{R_3}, \quad (3.10)$$

kde C_T je kapacita varikapu, C_2 je proměnná kapacita, R_3 a R_4 jsou nastavitelné rezistory. Ztrátový činitel varikapu pro Wienův můstek (obr. 3.9):

$$\operatorname{tg} \delta_T = \omega * C_2 * R_2, \quad (3.11)$$

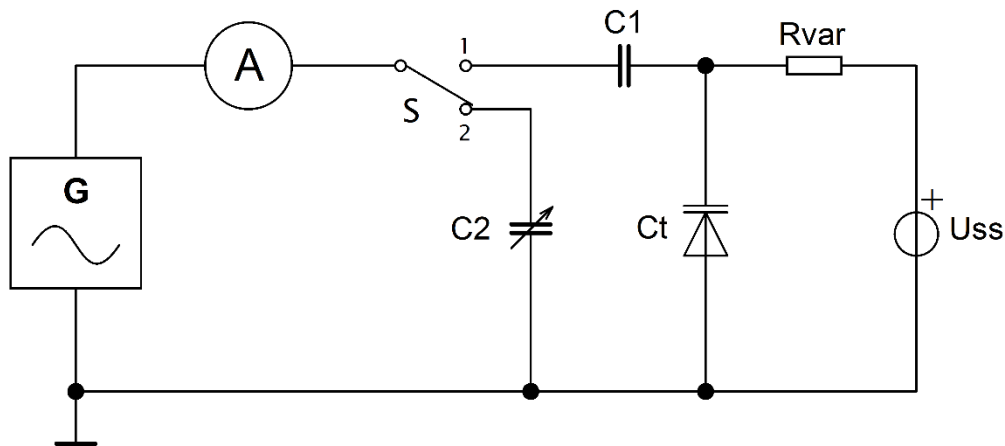
kde $\operatorname{tg} \delta_T$ je fázový úhel, C_2 je kapacita proměnného kondenzátoru a R_2 je odpor proměnného rezistoru. Ztrátový činitel varikapu pro Scheringův můstek (obr. 3.10):

$$\operatorname{tg} \delta_T = \omega * C_4 * R_4, \quad (3.12)$$

kde $\operatorname{tg} \delta_T$ je fázový úhel, C_4 je kapacita proměnného kondenzátoru a R_4 je odpor proměnného rezistoru.

3.5 Měření kapacitních diod substituční metodou

Tato metoda je založena na porovnání účinku varikapu a proměnného kondenzátoru, jehož velikost kapacity známe. Nejprve je tedy zapojen do obvodu měřený varikap a změříme proud, který jím prochází. Poté zapojíme např. kapacitní dekádu, pomocí které nastavíme stejnou hodnotu procházejícího proudu a následně odečteme velikost kapacity, kterou jsme museli nastavit, aby velikost proudu byla u obou měření stejná. [4]



Obr. 3.11 Zapojení pro měření substituční metodou.

3.6 Měření kapacitních diod pomocí Clappova oscilátoru

Tato metoda je podobná metodě rezonanční. Opět se zde využívá rezonance. Vychází ze známějšího Colpittsova oscilátoru. Rezonanční obvod zde tvoří kondenzátory C_1 , C_2 , C_3 , kapacita varikapu C_t a indukčnost L_1 . Rezistory R_2 a R_3 nastavují pracovní bod tranzistoru T_1 . Kmitočet odečítáme pomocí osciloskopu v emitoru tranzistoru T_1 na rezistoru R_4 . Kondenzátor C_1 stejnosměrně odděluje předpětí pro varikap U_{SS} od báze tranzistoru T_1 . Na základě podmínky rezonance:

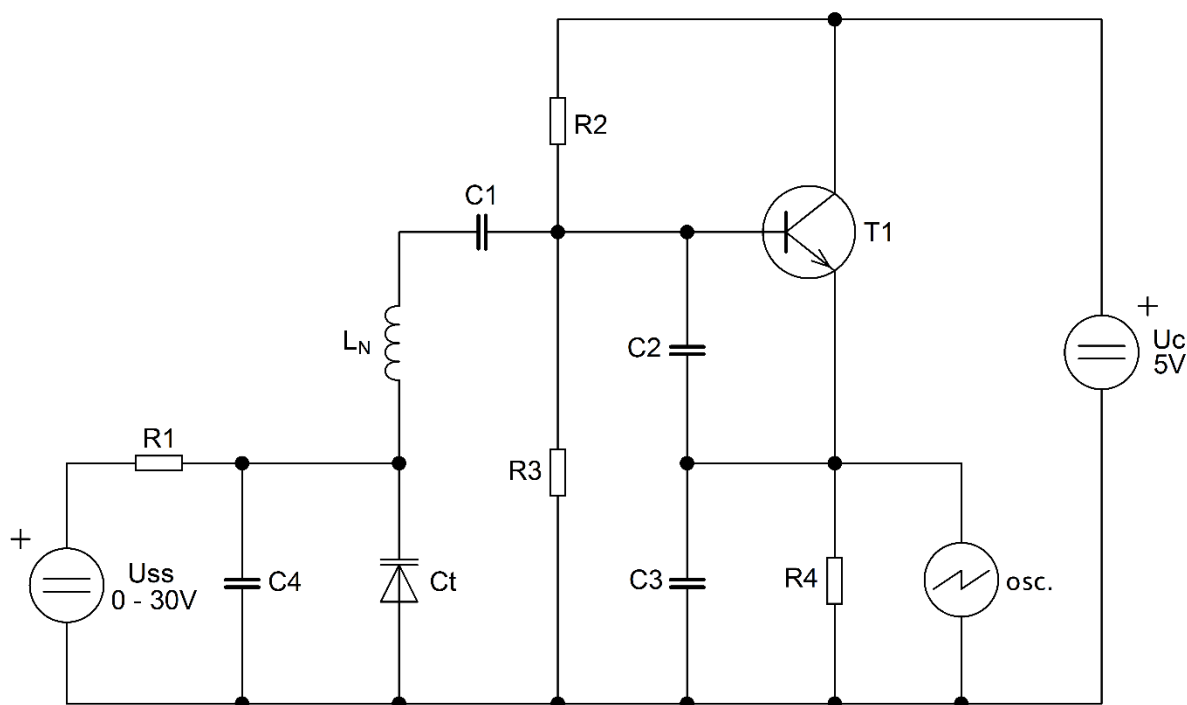
$$X_C = X_L \rightarrow 2 * \pi * f_R * L_1 = \frac{1}{2 * \pi * f_R * \left(\frac{C_{123} * C_T}{C_{123} + C_T} \right)}, \quad (3.13)$$

kde sériová kombinace C_1, C_2, C_3 je:

$$\frac{1}{C_{123}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}. \quad (3.14)$$

Rovnici po matematických úpravách upravíme na:

$$C_t = \frac{C_{123}}{(2 * \pi * f_R)^2 * C_{123} * L_1 - 1}. \quad (3.15)$$



Obr. 3.12 Schéma zapojení Clappova oscilátoru.

4 Praktické ověření měřících metod

Pro praktické ověření měřících metod byla vybrána Ohmova metoda a rezonanční metoda, pro ukázkou využití Ohmova zákona a Thomsonova vzorce v praxi. Dále také metoda s využitím Clappova oscilátoru, pro její zajímavost a určení kapacity bez použití generátoru. Přesný postup měření jednotlivých metod pro studenty je uveden v příloze. Měřený varikap byl zvolen BB640 a to z důvodu jeho velké kapacity.

Tab. 1 Základní parametry varikapu BB640

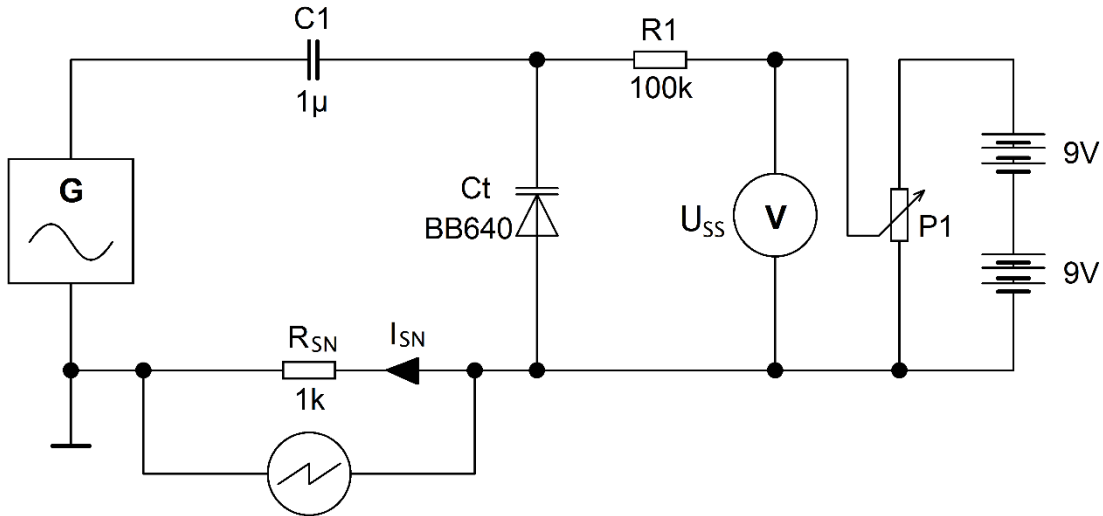
Závěrné napětí	V_R	30			V
Závěrné napětí špičkové	V_{RM}	35			V
Proud v propustném směru	I_F	20			mA
Provozní teplota	T_{OP}	-55 ... 150			°C
		Min.	Typ.	Max.	
Kapacita ($V_R = 1 V, f = 1 MHz$)	C_t	62	69	76	pF
Kapacita ($V_R = 28 V, f = 1 MHz$)	C_t	2,8	3,05	3,3	pF
Kapacitní zdvih ($V_R = 1 V, V_R = 25 V, f = 1 MHz$)	C_{t1}/C_{t28}	19,5		25	-

4.1 Ohmova metoda

Obecně jsou varikapy určeny k použití na vysokých frekvencích. Katalogový list varikapu BB640 udává většinu hodnot při měření na kmitočtu 1 MHz. Proto byl u této metody, pro možnost porovnání, zvolen také kmitočet $f_{GEN} = 1 MHz$, který je nastaven na vf generátoru. Na takto vysokých frekvencích již nelze proud měřit běžnými ampérmetry. Proto je protékající proud I_{SN} snímán přes snímací rezistor R_{SN} . Velikost snímacího rezistoru byla zvolena $R_{SN} = 1 k\Omega$. Je to dostatečně malá hodnota, aby námi připojená osciloskopická sonda, při kmitočtu $f_{GEN} = 1 MHz$, neovlivňovala snímací rezistor R_{SN} a zároveň dostačující pro odečítání úbytku napětí U_{SN} na R_{SN} . Úbytek napětí U_{SN} je tedy odečítán na známém rezistoru R_{SN} pomocí osciloskopu a následně protékající proud dopočten z Ohmova zákona:

$$I_{SN} = \frac{U_{SN}}{R_{SN}}, \quad (4.1)$$

kde lze proud protékající přes rezistor R_I zanedbat a uvažovat tedy, že celý proud I_{SN} protéká námi měřeným varikapem C_t .



Obr. 4.1 Schéma zapojení pro měření varikapů Ohmovo metodou.

Zároveň velikost přivedeného signálu U_{GEN} z vf generátoru musí být velmi malá, aby nedocházelo k ovlivnění velikosti kapacity přivedeným střídavým signálem. Při praktických měřeních, u této metody, se osvědčila efektivní hodnota přibližně $U_{GEN} = 500$ mV. Při napětí $U_{GEN} > 500$ mV dochází již ke zkreslení V-F charakteristiky zejména pro napětí $U_{SS} = 0$ V. Při napětí $U_{GEN} < 500$ mV nastane problém při odečítání hodnot U_{SN} pro napětí $U_{SS} > 10$ V, kdy napětí U_{SN} je tak malé, řádově 10^{-3} V, že na osciloskopu již lze vidět okolní šum. Napětí na varikapu U_{CT} , při uvažování ideálních součástí, lze dopočítat podle vztahu:

$$U_{CT} = \sqrt{U_{GEN}^2 - U_{SN}^2} \quad (4.2)$$

a následnou kapacitu podle vztahu:

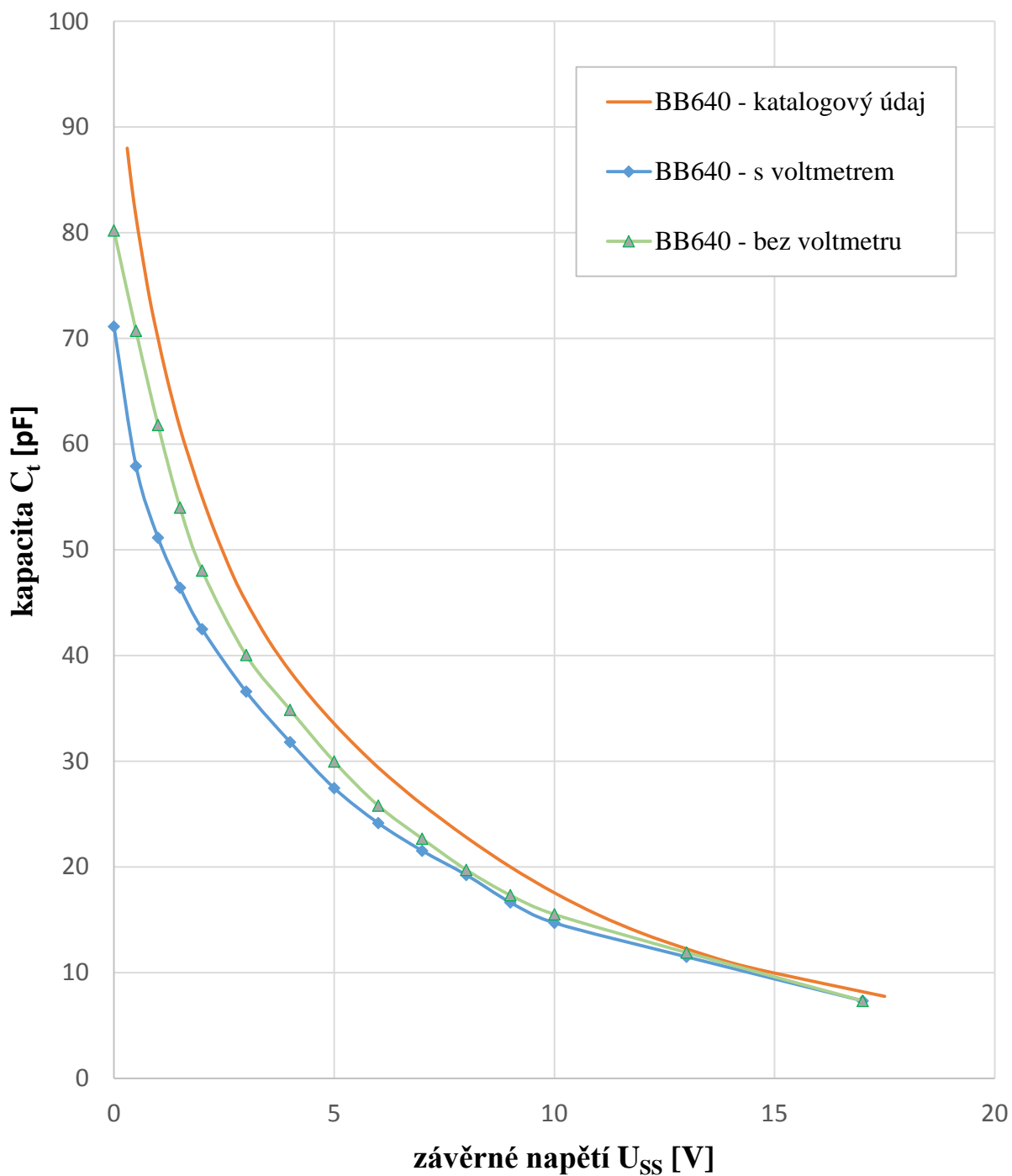
$$X_{CT} = \frac{U_{CT}}{I_{SN}} = \frac{1}{2 * \pi * f * C_t} \rightarrow C_t = \frac{I_{SN}}{2 * \pi * f * U_{CT}}. \quad (4.3)$$

Mírnou komplikací u této metody byla nutnost použití bateriového zdroje a potenciometru P_1 pro nastavování stejnosměrného napětí U_{SS} . Při použití laboratorního zdroje byl varikap touto metodou neměřitelný a to z důvodu různého zapojení zemního potenciálu generátoru s osciloskopem a zemního potenciálu laboratorního zdroje. U této metody docházelo také ke zkreslení výsledků po připojení voltmetru pro odečítání napětí U_{SS} s již poměrně krátkými měřicími kabely. Pro nejpřesnější výsledky je nejlepší tedy nastavit požadované napětí U_{SS} pomocí voltmetru V, voltmetr následně odpojit, včetně měřících kabelů a změřit úbytek napětí U_{SN} . Měření a výpočty byla provedena postupně pro všechna napětí U_{SS} dle **tab 2**.

Tab. 2 Naměřené a vypočtené hodnoty pro Ohmovu metodu s připojeným voltmetrem V.

$$U_{GEN} = 500 \text{ mV}, f_{GEN} = 1 \text{ MHz}$$

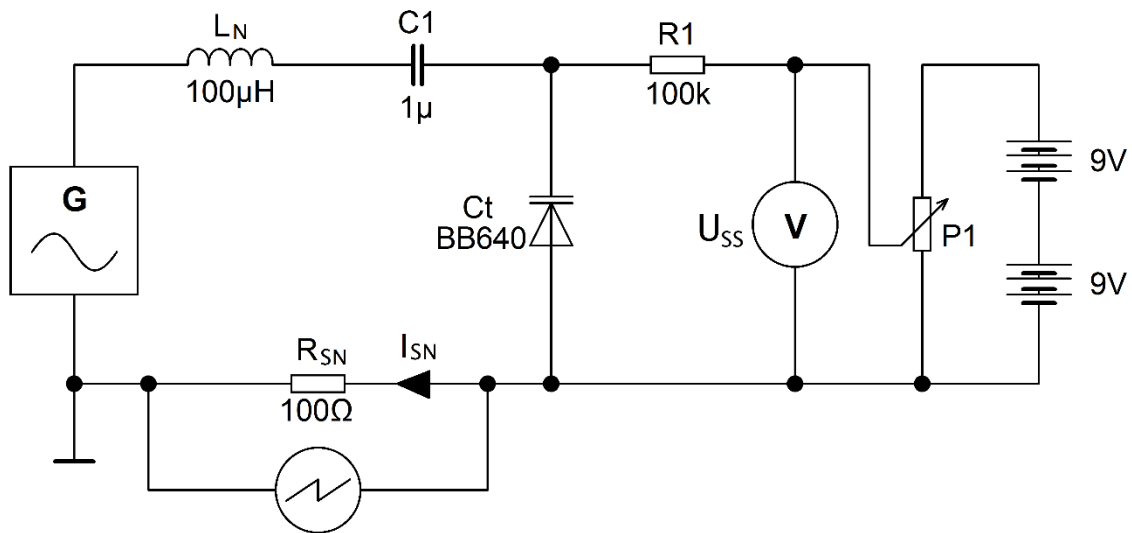
$U_{SS}[\text{V}]$	$U_{SN}[\text{mV}]$	$I_{SN}[\mu\text{A}]$	$U_{CT}[\text{mV}]$	$C_t[\text{pF}]$
0	204	204	456	71,1
0,5	171	171	470	57,9
1	153	153	476	51,1
1,5	140	140	480	46,4
2	129	129	483	42,5
3	112	112	487	36,6
4	99	99	490	32,1
5	85	85	493	27,5
6	77	77	494	24,8
7	67	67	495	21,5
8	60	60	496	19,2
9	52	52	497	16,6
10	46	46	497	14,7
13	36	36	498	11,5
17	23	23	499	7,3



Obr. 4.2 Porovnání výrobcem udávané kapacity varikapu BB640 se změřenou kapacitou Ohmovo metodou s připojeným voltmetrem a bez voltmetru v závislosti na připojeném závěrném napětí.

4.2 Rezonanční metoda

U této metody bylo zvoleno, pro praktickou realizaci, sériové zapojení s normálovou indukčností. Při sériové rezonanci se nastavuje maximální hodnota protékajícího proudu. Tato varianta byla vybrána z důvodu snadnějšího a názornějšího odečítání maximální hodnoty proudu I_{SN} , než při zapojení v paralelní rezonanci, kdy je odečítána minimální hodnota proudu I_{SN} . Princip měření proudu I_{SN} byl použit stejný, jako při Ohmově metodě (kapitola 4.1), tj. pomocí snímacího rezistoru R_{SN} a je tedy nastavována maximální hodnota úbytku napětí U_{SN} . Rezonanční kmitočet je nastavován pomocí vf generátoru. Vzhledem k měření vyšších kmitočtů, než už Ohmovo metody, byla z důvodu minimalizace vlivu osciloskopické sondy na výsledky měření, zvolena velikost snímacího rezistoru $R_{SN} = 100 \Omega$. Výstupní napětí U_{GEN} lze u této metody snížit na $U_{GEN} = 100 \text{ mV}$, tím lze dosáhnout přesnějších výsledků měření při předpětí $U_{SS} = 0 \text{ V}$.



Obr. 4.3 Schéma zapojení pro měření varikapů rezonanční metodou.

Vzhledem k měření v oblasti vyšších kmitočtů se začíná také projevovat parazitní kapacita cívky L_N . Proto je nutné, pro přesnost výsledků, dosadit fiktivní hodnotu indukčnosti L'_N podle vzorce: [7]

$$L'_N = \frac{L_N}{1 - \frac{f_R}{f_{LNR}}}, \quad (4.4)$$

kde L_N je skutečná hodnota normálové cívky 100 μH , f_{LNR} je rezonanční kmitočet cívky 9 MHz a f_R je naměřený rezonanční kmitočet při sériové rezonanci. Výslednou kapacitu varikapu lze dopočítat podle vzorce (3.3):

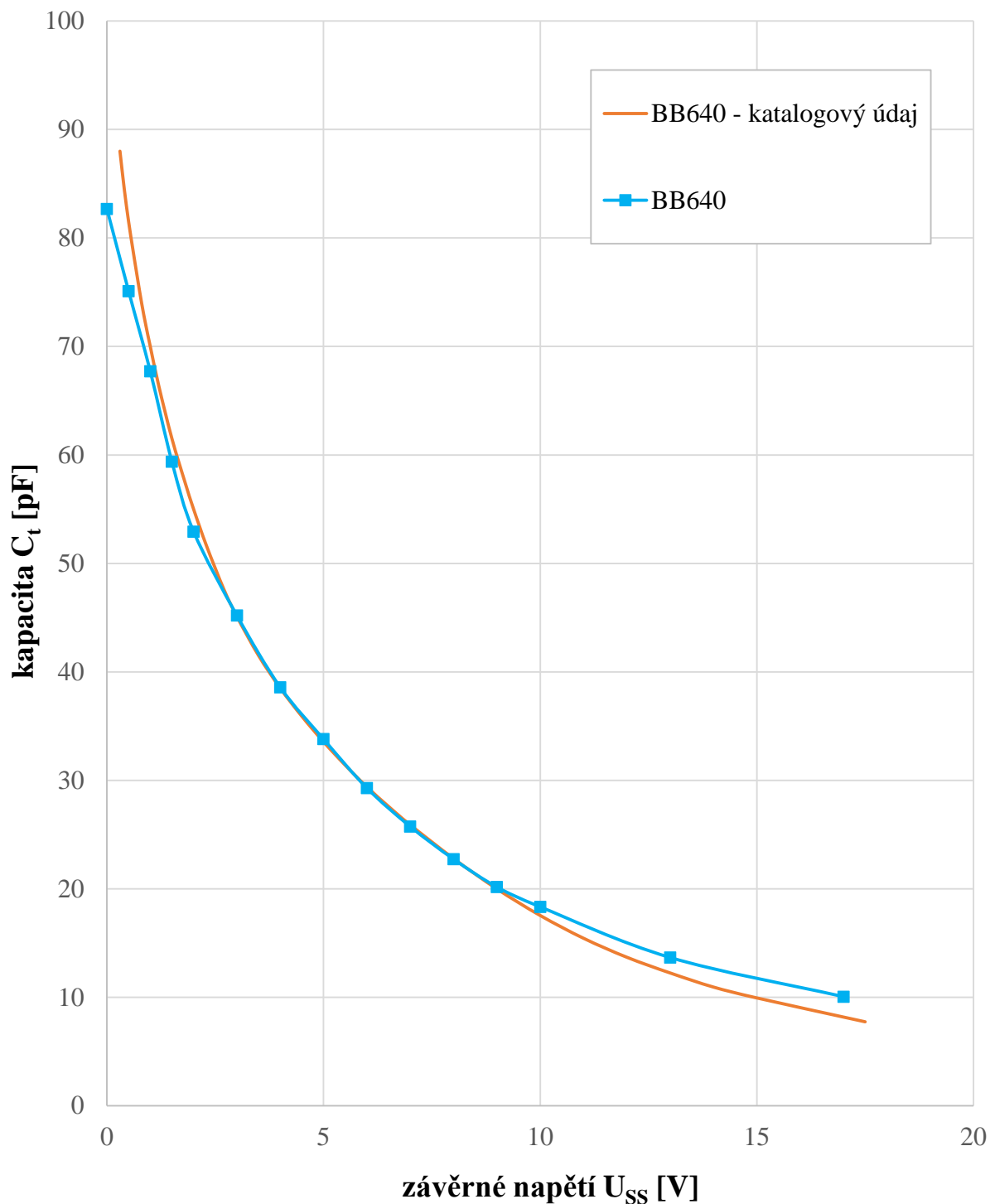
$$C_t = \frac{1}{(2 * \pi * f_R)^2 * L'_N} \quad (4.5)$$

Měření rezonančního kmitočtu a následné výpočty byla provedena opět pro všechna napětí U_{SS} dle **tab. 3**.

Tab. 3 Naměřené a vypočtené hodnoty u rezonanční metody.

$U_{GEN} = 100 \text{ mV}$

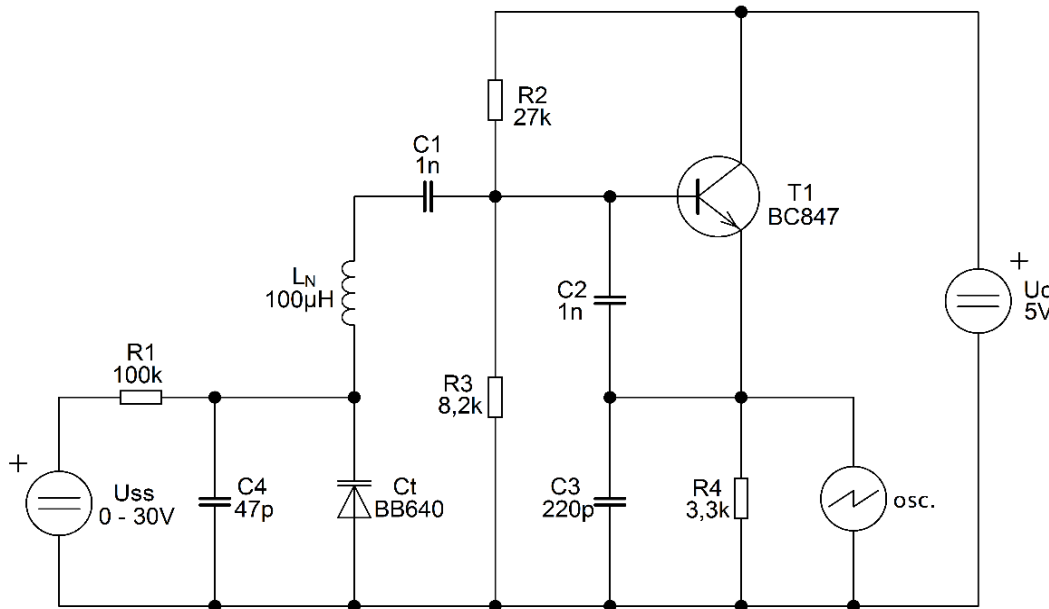
$U_{SS} [\text{V}]$	$f_R [\text{MHz}]$	$L'_N [\mu\text{H}]$	$C_t [\text{pF}]$
0	1,71	104,8	82,7
0,5	1,79	105,3	75,1
1	1,88	105,8	67,7
1,5	2,00	106,7	59,4
2	2,11	107,5	52,9
3	2,27	108,8	45,2
4	2,44	110,3	38,6
5	2,59	111,7	33,8
6	2,76	113,5	29,3
7	2,92	115,4	25,8
8	3,08	117,4	22,7
9	3,24	119,6	20,2
10	3,37	121,6	18,4
13	3,79	128,9	13,7
17	4,25	139,3	10,0



Obr.4.4 Porovnání výrobcem udávané kapacity varikapu BB640 se změřenou kapacitou rezonanční metodou v závislosti na připojeném závěrném napětí.

4.3 Měření kapacity pomocí Clappova oscilátoru

Základem této metody je Clappův oscilátor, kde je pomocí osciloskopu měřena frekvence, na které oscilátor kmitá. Následně podle známých hodnot okolních součástek oscilátoru je dopočtena výsledná kapacita varikapu. Není potřeba žádný generátor, žádné snímací rezistory a zemní potenciál je tedy stejný pro napěťové zdroje i pro osciloskop. Není tedy potřeba použít bateriové napájení pro předpětí varikapu U_{SS} .



Obr. 4.5 Schéma zapojení pro měření varikapů pomocí Clappova oscilátoru.

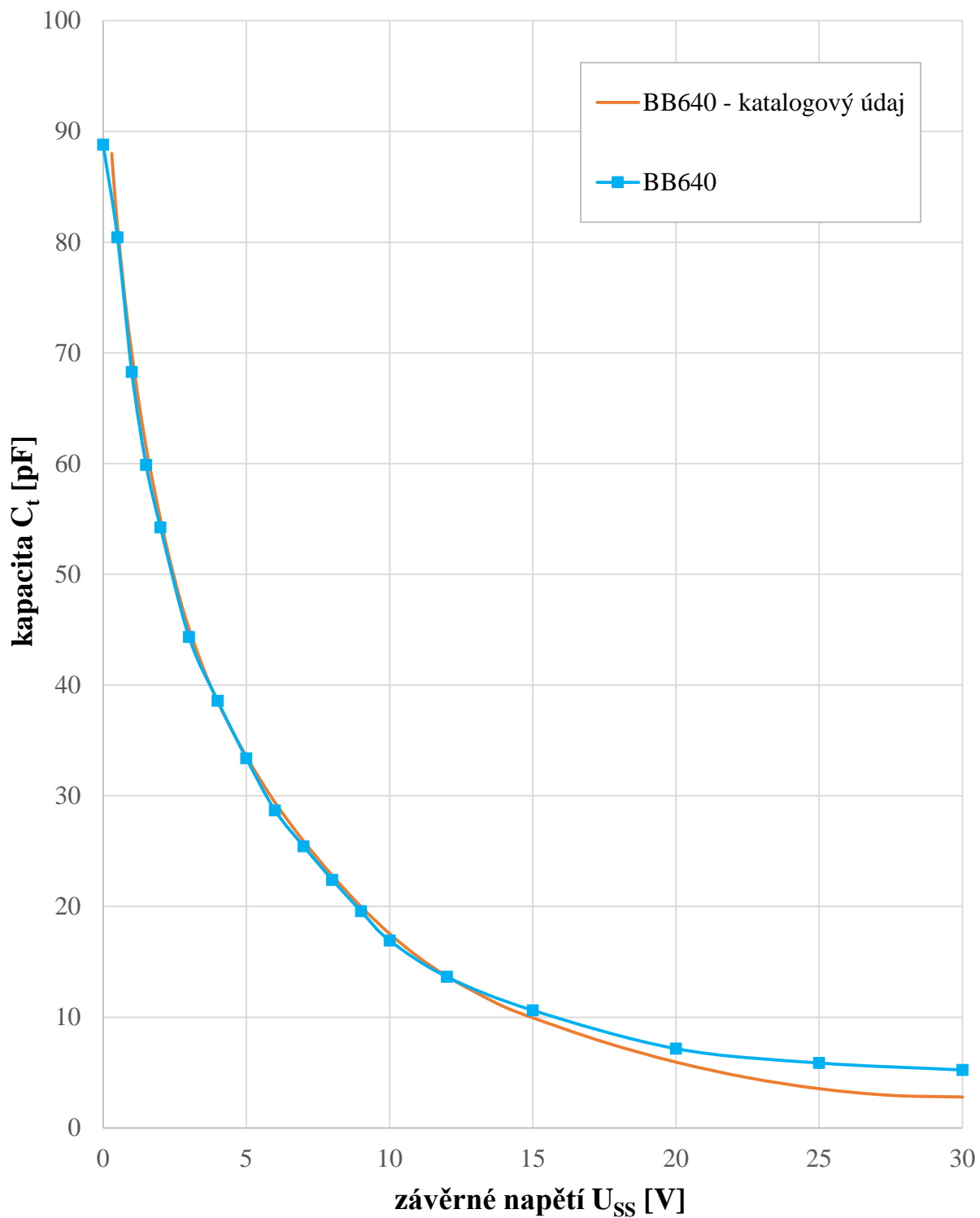
Rezonanční obvod tvoří kondenzátory C_1 , C_2 , C_3 , L_1 a paralelní kombinace C_t a C_4 . Bez zapojení kondenzátoru C_4 přestal oscilátor kmitat pro napětí $U_{SS} = 8$ V. Oscilátor kmitá na kmitočtu přibližně 2 MHz, proto je pro přesnost výsledků vhodné opět počítat s fiktivní hodnotou indukčnosti L'_N , dle vzorce (4.4), který byl použit u samotné rezonanční metody (kapitola 4.2). Výsledná kapacita varikapu je dopočtena podle vzorce (3.15) s odečtením kapacity paralelně zapojeného kondenzátoru C_4 k měřenému varikapu:

$$C_t = \frac{C_{123}}{(2 * \pi * f_R)^2 * C_{123} * L'_N - 1} - C_4, \quad (4.6)$$

kde C_{123} je sériová kombinace kondenzátorů C_1 , C_2 , C_3 . Měření a výpočty byla provedena postupně pro všechna napětí U_{SS} dle **tab. 4**.

Tab. 4 Naměřené a vypočtené hodnoty pomocí Clappova oscilátoru.

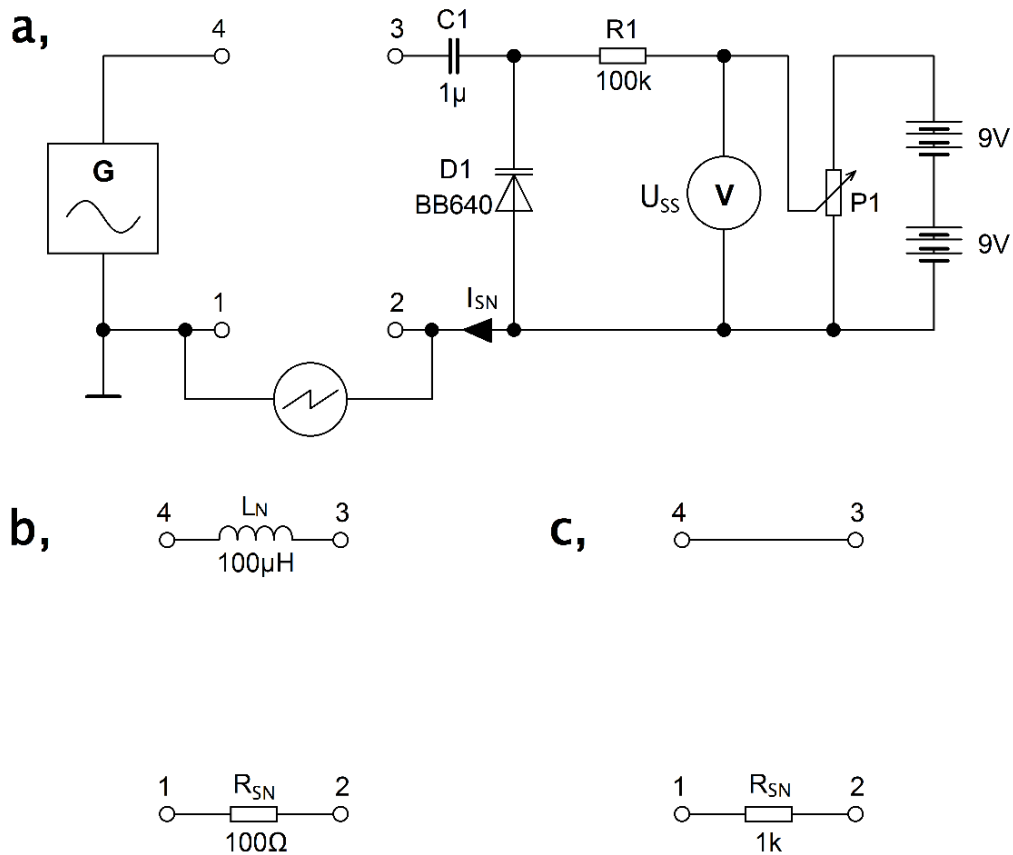
U_{ss} [V]	f_R [MHz]	L'_N [μ H]	C_t [pF]
0	1,83	105,2	88,8
0,5	1,86	105,4	80,4
1	1,91	105,7	68,3
1,5	1,96	105,9	58,0
2	1,98	106,1	54,3
3	2,04	106,5	44,3
4	2,08	106,8	38,6
5	2,12	107,0	33,4
6	2,16	107,3	28,7
7	2,20	107,5	24,4
8	2,23	107,7	21,5
9	2,25	107,9	19,6
10	2,28	108,1	16,9
12	2,32	108,4	14,5
15	2,36	108,7	10,6
20	2,41	109,1	7,2
25	2,43	109,2	5,9
30	2,44	109,3	5,2



Obr. 4.6 Porovnání výrobcem udávané kapacity varikapu BB640 se změřenou kapacitou pomocí metody s Clappovým oscilátorem v závislosti na připojeném závěrném napětí.

5 Realizace přípravku pro měření varikapů

Realizace přípravku s Clappovým oscilátorem byla realizována samostatně. Ohmova a rezonanční metoda byly sloučeny v jeden, protože mají velmi podobné schéma zapojení. Jejich rozdíl spočívá v použití rozdílné hodnoty snímacího rezistoru R_{SN} a nahrazení normálové cívky L_N propojkou v závislosti na zvolené metodě. Cívku zapojíme v případě metody rezonanční, propojku v případě Ohmovy. Byl tedy postaven jeden hlavní přípravek, kde schéma zapojení je totožné pro obě metody a následně dvě malé, vyměnitelné desky, kde každá je použita pro zvolený typ měření. Změna se tedy provádí výměnou malého desky na přípravku. Schéma zapojení je na obr. 5.1.

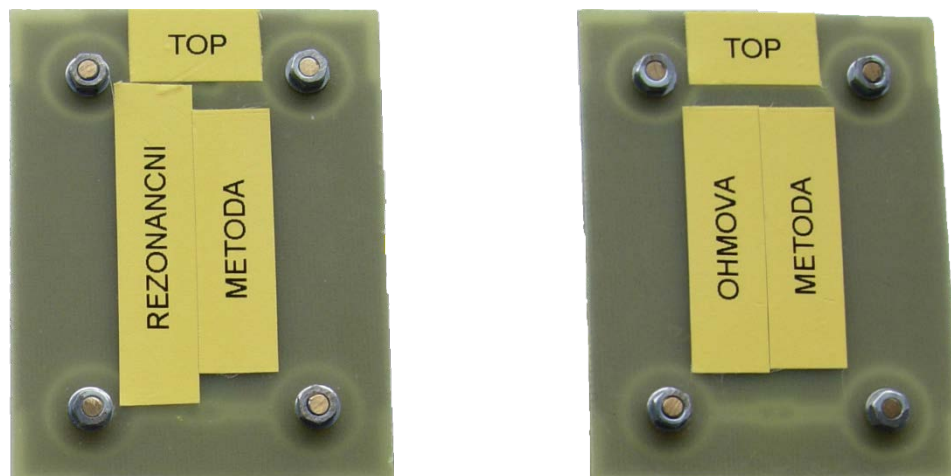


Obr. 5.1 Schéma zapojení přípravku Ohmovo a rezonanční metodou: a) schéma zapojení pro obě metody; b) schéma zapojení vyměnitelného přípravku pro rezonanční metodu; c) schéma zapojení vyměnitelného přípravku pro Ohmovo metodu.

Pro oba přípravky byla navržena deska plošných spojů pomocí programu EAGLE. Po vyrobení DPS a osazení, fungovaly přípravky bezchybně na první zapojení. U zapojení s Clappovým oscilátorem se po několika zkušebních měření vyskytl problém s naměřenou rezonanční frekvencí. Ta vycházela nestabilní a s hodnotami, které po dopočtení podle vzorce (4.6), vedly k chybné kapacitě měřeného varikapu. Důvodem byl, okem neviditelný, naprasklý kondenzátor C_1 , který stejnosměrné napětí U_{SS} odděluje od báze tranzistoru T_1 . Po výměně C_1 , přípravek znovu fungoval. Po dalším testování byla opět objevena miniaturní prasklina. Jako příčina se nakonec ukázala manipulace s měřicími přívody. Kdy při zasouvání a vysouvání měřících kabelů docházelo k velkému prohybu desky, které způsobilo prasklinu součástky. Celý problém byl vyřešen přidáním distančního sloupku, který prohyb eliminuje.



Obr. 5.2 Základní přípravek pro Ohmovu a rezonanční metodu.



Obr. 5.3 Vyměnitelné desky pro Ohmovu a rezonanční metodu.



Obr 5.4 Přípravek na měření varikapů Clappovým oscilátorem.

Závěr

Cílem bakalářské práce bylo zrealizovat přípravek pro měření kapacitních diod v rámci cvičení předmětu KET/SPS a navrhnout postup měření pro studenty. Před realizací samotného přípravku byly nejprve vybrané metody otestovány na univerzální cuprexitové desce.

Pro Ohmovu a rezonanční metodu byl otestován způsob měření proudu při kmitočtu 1 MHz. Použití snímacího rezistoru R_{SN} a snímání jeho úbytku napětí U_{SN} osciloskopem, se zdálo být od počátku dostatečně přesné. Pouze bylo potřeba doladit jeho velikost a to vzhledem k minimálnímu ovlivnění naměřených hodnot připojenou osciloskopickou sondou. Mírná komplikace v podobě různých zemních potenciálů byla vyřešena bateriovým napájením.

U metody s Clappovým oscilátorem a především u rezonanční metody, zpočátku příliš nesouhlasily naměřené a vypočtené hodnoty s údaji uváděnými v katalogovém listu. Bylo zjištěno, že na vyšších frekvencích začíná výsledky značně ovlivňovat parazitní kapacita použité normálové cívky L_N . Tato nepřesnost ve výsledcích byla odstraněna dosazením fiktivní indukčnosti L'_N .

Po doladění měřících metod začala samotná realizace přípravku. Vzhledem k velmi podobnému zapojení Ohmovy a rezonanční metody, byly tyto metody sloučeny do jednoho přípravku s možností jejich výběru. Metoda s Clappovým oscilátorem byla zrealizována samostatným přípravkem. Oba přípravky byly znovu otestovány a od letního semestru na nich již úspěšně probíhá praktická část výuky studentů.

LITERATURA

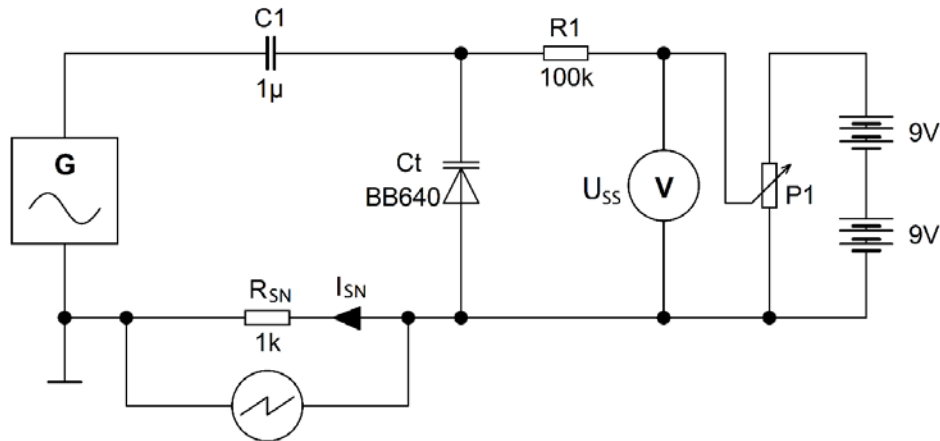
- [1] VANÍČEK, F. *Elektronické součástky: principy, vlastnosti, modely*. Vydání 2 Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. 357 stran. ISBN 80-01-03112-8
- [2] BRZOBOHATÝ J., MUSIL V., BAJER A., BOUŠEK J. *Elektronické součástky* [online]. Brno: VUT v Brně, 2002 [cit. 2014-12-15]. Dostupný z [www: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~bousek/Elektronicke_soucastky_aktualni.pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~bousek/Elektronicke_soucastky_aktualni.pdf)
- [3] FIALA, M., HERCIK, J., VROŽINA, M. *Elektrotechnická měření I*. Praha: SNTL, 1981. 352 stran.
- [4] *Elektrotechnická měření*. Praha: BEN, 2002. ISBN 80-7300-022-9
- [5] *Měření kapacity*. [online]. [cit. 2014-01-07]. Dostupné z [www: www:e-c.wz.cz/cz/uploaded/EM3-04.DOC](http://www.e-c.wz.cz/cz/uploaded/EM3-04.DOC)
- [6] *PN přechod – dioda*. [online]. [cit. 2015-4-20]. Dostupné z [www: http://lucy.troja.mff.cuni.cz/~tichy/elektross/soucastky/jeden_prechod/dioda.html](http://lucy.troja.mff.cuni.cz/~tichy/elektross/soucastky/jeden_prechod/dioda.html)
- [7] EICHLER, J. *Elektronická měření*. Praha: Vydavatelství SNTL, 1971. 488 stran.

Příloha - Návrh měřicí úlohy pro studenty

Měření kapacity varikapu Ohmovo metodou

Úkoly měření:

1. Zapojte přípravek pro měření kapacitních diod Ohmovo metodou dle schématu.



Obr. A Schéma zapojení přípravku pro měření Ohmovo metodou

2. Na generátoru nastavte sinusový průběh napětí s efektivní hodnotou napětí $U_{GEN} = 500 \text{ mV}$ a frekvenci $f = 1 \text{ MHz}$. Pomocí potenciometru P nastavujte napětí U_{SS} dle **tab. A**. Na osciloskopu odečtěte úbytek napětí na R_{SN} a zaznamenejte do tabulky.
3. Na základě změřeného úbytku napětí na rezistoru spočítejte podle Ohmova zákona protékající proud I_{SN} . Napětí na varikapu U_{CT} lze vypočítat ze vztahu

$$U_{CT} = \sqrt{U_{GEN}^2 - U_{R2}^2},$$

a výslednou kapacitu ze vztahu:

$$X_{CT} = \frac{U_{CT}}{I_{SN}} = \frac{1}{2 * \pi * f * C_t} \rightarrow C_t = \frac{I_{SN}}{2 * \pi * f * U_{CT}}.$$

4. Výslednou kapacitu C_t vyneste do grafu.

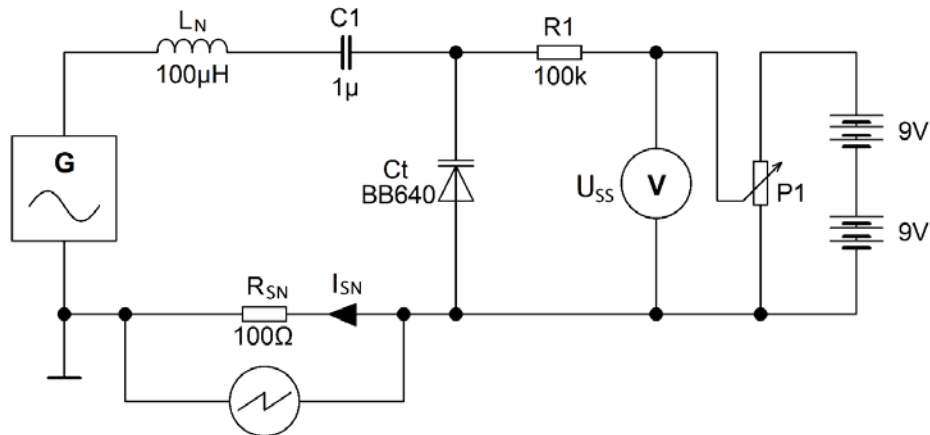
Tab. A Naměřené a vypočtené hodnoty pro Ohmovu metodu

$U_{ss}[V]$	$U_{sN}[mV]$	$I_{sN}[\mu A]$	$U_{ct}[mV]$	$C_t[pF]$
0				
0,5				
1				
1,5				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
13				
17				

Měření kapacity varikapu rezonanční metodou

Úkoly měření:

1. Zapojte přípravek pro měření kapacitních diod pomocí sériové rezonance dle schématu.



Obr. B Schéma zapojení přípravku pro měření rezonanční metodou.

2. Na generátoru ponechte nastavený sinusový průběh napětí. Snižte efektivní hodnotu na $U_{GEN} = 150\text{mV}$. Pomocí potenciometru P nastavujte napětí U_{SS} dle **tab. B**. Pomocí generátoru nastavte pro všechna napětí U_{SS} takovou frekvenci f_R , aby byl obvod v rezonanci, tj. nastavte největší možnou výchylku napětí na snímacím rezistoru R_{SN} . Naměřené hodnoty zaznamenejte do tabulky.
3. Na základě podmínky rezonance a změřeného rezonančního kmitočtu vypočtete kapacitu varikapu podle:

$$X_L = X_C \rightarrow 2 * \pi * f_R * L'_N = \frac{1}{2 * \pi * f_R * C_t} \rightarrow C_t = \frac{1}{(2 * \pi * f_R)^2 * L'_N}.$$

Vzhledem k měření vyšších kmitočtů se začíná již projevovat parazitní kapacita cívky. Proto je nutné, pro přesnost výsledků, dosadit fiktivní hodnotu L'_N podle vzorce:

$$L'_N = \frac{L_N}{1 - \frac{f_R}{f_{LNR}}},$$

kde L_N je skutečná hodnota $100 \mu\text{H}$ a f_{LNR} je rezonanční kmitočet cívky 9 MHz a f_R je námi naměřený rezonanční kmitočet sériové rezonance podle obr. 2.

4. Výslednou kapacitu C_T vynesete do grafu

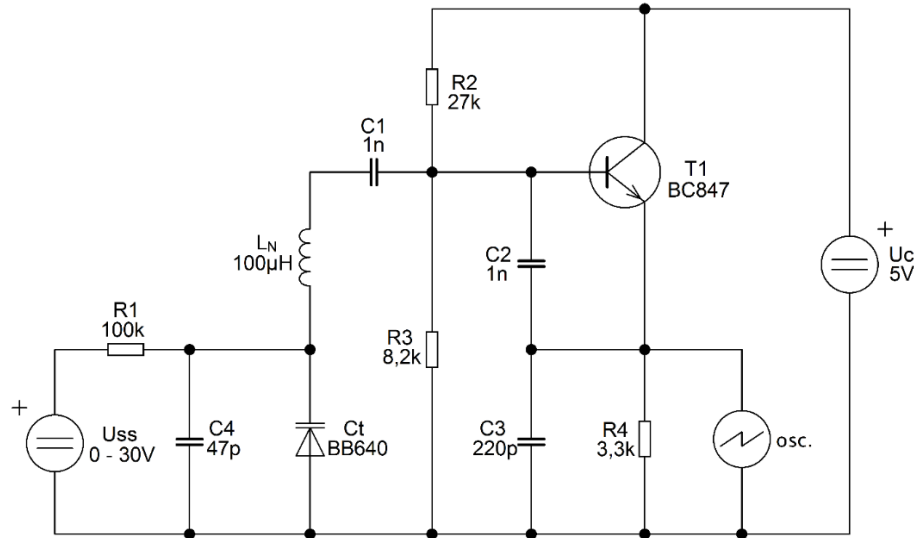
Tab. B Naměřené a vypočtené hodnoty pro rezonanční metodu.

U_{ss} [V]	f_R [MHz]	L'_N [μ H]	C_t [pF]
0			
0,5			
1			
1,5			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
13			
17			

Měření kapacity varikapu pomocí Clappova oscilátoru

Úkoly měření:

1. Zapojte přípravek pro měření kapacitních diod pomocí Clappova oscilátoru.



Obr. C Schéma zapojení přípravku pro měření pomocí Clappova oscilátoru

2. Pomocí regulovatelného zdroje nastavujte napětí U_{SS} dle **tab. C**. Na osciloskopu odečtěte frekvenci oscilátoru a zaznamenejte do tabulky.
3. Na základě podmínky rezonance lze výše uvedený oscilátor popsat rovnicí:

$$2 * \pi * f_R * L_N = \frac{1}{2 * \pi * f_R * \left(\frac{C_{123} * (C_4 + C_t)}{C_{123} + C_4 + C_t} \right)},$$

z které lze po matematických úpravách vyjádřit výslednou kapacitu varikapu C_t :

$$C_t = \frac{C_{123}}{(2 * \pi * f_R)^2 * C_{123} * L'_N - 1} - C_4,$$

kde za indukčnost L_N opět dosadíme, vzhledem k vysokým kmitočtům, fiktivní hodnotu indukčnosti L'_N jako u rezonanční metody. Sériová kombinace

$$\frac{1}{C_{123}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \rightarrow C_{123} = 152.78 * 10^{-12}.$$

4. Výslednou kapacitu C_t vynesete do grafu.

Tab. C Naměřené a vypočtené hodnoty pro měření na Clappově oscilátoru.

U_{ss} [V]	f_R [MHz]	L'_N [μ H]	C_t [pF]
0			
0,5			
1			
1,5			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
12			
15			
20			
25			
30			