

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroniky a informačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Měřicí systém pro ověření parametrů OCXO oscilátoru

Autor práce: **Bc. Luboš Boula**
Vedoucí práce: **Ing. Michal Pokorný, Ph.D.**

2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Luboš BOULA**
Osobní číslo: **E20N0057P**
Studijní program: **N0714A060013 Elektronika a informační technologie**
Specializace: **Informační a komunikační technologie**
Téma práce: **Měřicí systém pro ověření parametrů OCXO oscilátoru**
Zadávací katedra: **Katedra elektroniky a informačních technologií**

Zásady pro vypracování

1. Shrňte používané druhy oscilátorů referenčních frekvencí, jejich využití v měřicí technice, jejich vlastnosti, přednosti a použití.
2. Navrhněte a realizujte měřicí přípravek a měřicí systém, složený z přístrojů firmy Rohde&Schwarz pro měření OCXO oscilátorů.
3. Vytvořte měřicí program pro ovládání navrženého měřicího systému, který bude zapisovat naměřené parametry do protokolu.


Rozsah diplomové práce: **40 – 60**
Rozsah grafických prací: **5**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Hoffmann K., Hudec P., Sokol V.: Aktivní mikrovlnné obvody, ČVUT Praha 2004, ISBN 80-01-02936-0.
2. Hoffmann K., Hudec P.: Vysokofrekvenční a mikrovlnná měření, ČVUT Praha 2006, ISBN 80-01-03442-9.
3. Ghione G.: Microwave Electronics, Cambridge 2018, ISBN 978-1-107-17027-8 .
4. Herout P: Učebnice jazyka C, Kopp Č. Budějovice 2001, ISBN 80-85828-21-9.
5. Test Management Software G5 User Manual, R&S User manual 5017.1565.12-01.12.
6. Další manuály a dokumentace ke zvoleným měřicím přístrojům Rohde&Schwarz apod.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Michal Pokorný, Ph.D.**
Katedra elektroniky a informačních technologií

Datum zadání diplomové práce: **7. října 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2023**



L.S.

Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 7. října 2022

Abstrakt

V současné komunikační a radarové technice ve vysokofrekvenčních pásmech je potřeba zajistit vysokou přesnost a spolehlivost elektronických zařízení. Pro zajištění těchto vysokých nároků je potřeba sestavit, otestovat a provést kontrolu jakosti výrobku. Cílem této práce je navrhnout a realizovat měřicí systém pro ověření parametrů teplotně stabilizovaného krystalového oscilátoru (Oven Controlled Crystal Oscillator, OCXO), které jsou klíčovou součástí těchto vysokofrekvenčních systémů. Navržený systém umožní obsluze urychlit a zjednodušit měření testovaného přípravku. Zjištěné hodnoty se automaticky zapisují do protokolu, který stanovuje přesnost, spolehlivost a kvalitu výrobku. Pro návrh a realizaci této práce byly použity programy a přístroje společnosti Rohde&Schwarz. Výsledkem je funkční měřicí systém, který ověří správnost desky plošných spojů OCXO oscilátoru a vyhodnotí parametry, které musí deska splňovat podle měřicího předpisu zadaného společností Rohde&Schwarz.

Klíčová slova

Oscilátory OCXO, teplotně stabilizované oscilátory, SPI sběrnice, automatizace měření, měřicí pracoviště

Abstract

In current communication and radar technology in high-frequency bands, it is necessary to ensure high accuracy and reliability of electronic devices. To achieve these high demands, the product must be assembled, tested and quality checked. The goal of this work is to design and implement a measurement system for verifying the parameters of OCXO oscillators, a key part of these high-frequency systems. The designed system will allow the operator to speed up and simplify the measurement of the tested device. The measured values are automatically recorded in a log that determines the accuracy, reliability and quality of the product. Programs and equipment from Rohde&Schwarz were used for the design and implementation of this work. The result is a functional measurement system that verifies the correctness of the OCXO oscillator circuit board and evaluates parameters that correspond to the measurement prescription set by Rohde&Schwarz.

Key Words

OCXO oscillators, temperature stabilized oscillators, SPI bus, measurement automatization, measuring site

Poděkování

Chtěl bych velice poděkovat svému vedoucímu diplomové práce, panu Ing. Michalovi Pokornému, Ph.D., za vstřícné vedení a podporu při tvorbě diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Martinovi Kudrlemu, panu Ing. Václavovi Královi, panu Ing. Tomášovi Havlovi a panu Ing. Ivanovi Koulovi za poskytnuté konzultace a technickou podporu během vývoje. V neposlední řadě patří velké díky mojí rodině za psychickou podporu a klidné zázemí.

Obsah

1	Úvod	- 11 -
1.1	Vznik diplomové práce	- 11 -
1.2	Cíle diplomové práce	- 11 -
2	Teoretický rozbor	- 12 -
2.1	Oscilátory	- 12 -
2.1.1	Krystalové oscilátory	- 12 -
2.1.2	VCXO – Krystalový oscilátor doladovaný napětím	- 20 -
2.1.3	TCXO – Krystalový oscilátor teplotně kompenzovaný	- 23 -
2.1.4	OCXO – Teplotně stabilizovaný krystalový oscilátor	- 25 -
2.1.5	Porovnání vlastností VCXO, TCXO a OCXO	- 29 -
2.2	Číslicově-analogový převodník	- 32 -
2.3	Sériové sběrnice	- 32 -
2.3.1	SPI (Serial Peripheral Interface)	- 32 -
2.3.2	I2C	- 33 -
2.4	Ovládání měřicích přístrojů pomocí rozhraní VISA	- 34 -
2.4.1	GPIB sběrnice	- 34 -
2.4.2	Přenos po síti s využitím TCP/IP	- 35 -
2.4.3	Sběrnice USB	- 35 -
2.5	Sériová výroba	- 35 -
2.5.1	Sklad materiálu	- 35 -
2.5.2	Sítotisk	- 36 -
2.5.3	Automatické osazování součástek	- 36 -
2.5.4	Pájení SMD součástek	- 37 -
2.5.5	Optická kontrola	- 38 -
2.5.6	Funkční testy	- 38 -
2.6	Měřicí pracoviště	- 39 -
2.6.1	Blokové schéma	- 40 -
2.6.2	Reléové pole	- 40 -
2.6.3	Měřicí adaptér	- 41 -

2.6.4	Testovací program	- 41 -
3	Praktická realizace	- 42 -
3.1	Měřicí předpis	- 42 -
3.2	Zadání měření.....	- 42 -
3.3	Deska plošných spojů oscilátoru OCXO blokové schéma (DUT).....	- 44 -
3.4	Zapojení měřicího adaptéru.....	- 44 -
3.5	Zapojení konektoru v měřicím adaptéru pro testování OCXO	- 45 -
3.6	Modelování a konstrukce měřicího adaptéru	- 47 -
3.7	Elektrické zapojení měřicího adaptéru	- 48 -
3.8	Testovací program.....	- 49 -
3.9	Měření OCXO	- 49 -
3.9.1	Měření odebíraného proudu při napájecím napětí 11 V (měření 1).....	- 49 -
3.9.2	Měření odchylky od nominální frekvence OCXO při variabilním napájecím napětím (měření 2).....	- 50 -
3.9.3	Umělé stárnutí.....	- 52 -
3.9.4	Změna frekvence při jednom kroku potenciometru (měření 3).....	- 53 -
3.9.5	Nastavení pracovní frekvence OCXO (měření 4).....	- 54 -
3.9.6	Měření výstupní úrovně OCXO při 10 MHz (měření 5)	- 55 -
3.10	Zápis dat do EEPROM	- 56 -
3.11	Předání do výroby.....	- 57 -
	Zhodnocení a závěr.....	- 58 -
	Literatura.....	- 60 -
	Seznam tabulek	- 62 -
	Seznam obrázků.....	- 63 -
	Přílohy.....	I

Seznam symbolů a zkratek

Značka	Popisek	Jednotka
<i>API</i>	Rozhraní pro programování aplikací (Application Programming Interface)	-
<i>AT</i>	Typ řezu krystalu	-
<i>Balun</i>	Symetizační člen	-
<i>C</i>	Kapacita	F
<i>C</i>	Programovací jazyk	-
<i>CS</i>	Chip Select	-
<i>DAC</i>	Digitální převodník (Digital Analog Converter)	-
<i>dB</i>	Logaritmická jednotka úrovně	-
<i>dBm</i>	Logaritmická jednotka úrovně výkonu	-
<i>DC</i>	Stejnoseměrné napětí	-
<i>DPS</i>	Deska plošných spojů	-
<i>DUT</i>	Testované zařízení (Device Under Test)	-
<i>EEPROM</i>	Elektricky vymazatelná paměť pouze pro čtení (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory)	-
<i>f</i>	Frekvence	Hz
<i>f_a</i>	Paralelní rezonanční frekvence	Hz
<i>f_{cs}</i>	Sériová rezonanční frekvence krystalu + sériová kapacita	Hz
<i>FLL</i>	Factory Lower Limit	-
<i>f_{LSP}</i>	Paralelní rezonanční frekvence krystalu + sériová indukčnost	Hz
<i>f_{LSS}</i>	Sériová rezonanční frekvence krystalu + sériová indukčnost	Hz
<i>FM</i>	Frekvenční modulace	-
<i>f_r</i>	Sériová rezonanční frekvence	Hz
<i>FUL</i>	Factory Upper Limit	-
<i>GND</i>	Ground	-
<i>GPIB</i>	Sběrnice pro komunikaci přístrojů (General Purpose Interface Bus)	-
<i>HF</i>	Vysokofrekvenční signál (High Frequency)	-
<i>Hz</i>	Jednotka Hertz	-
<i>I</i>	Proud	A
<i>I2C</i>	Sériová sběrnice I2C (Internal-Integrated-Circuit Bus)	-
<i>IO</i>	Digitální bit (Input/Output)	-
<i>IT</i>	Typ řezu krystalu	-
<i>L</i>	Indukčnost	H
<i>LAN</i>	Lokální počítačová síť (Local Area Network)	-
<i>LC</i>	Rezonátor (cívka a kondenzátor)	-
<i>LF</i>	Nízkofrekvenční signál (Low Frequency)	-
<i>MISO</i>	Součásti SPI (Master In Slave Out)	-
<i>MOSI</i>	Součásti SPI (Master Out Slave In)	-
<i>NTC</i>	Termistor s negativním teplotním koeficientem (Negative Temperature Coefficient)	-
<i>OCXO</i>	Teplotně stabilizovaný krystalový oscilátor (Oven Controlled Crystal Oscillator)	-
<i>out</i>	Výstup	-
<i>ppb</i>	Počet dílků na jednu miliardu (Parts Per Billion)	-
<i>ppm</i>	Počet dílků na jeden milion (Parts Per Million)	-
<i>PTC</i>	Termistor s pozitivním teplotním koeficientem (Positive Temperature Coefficient)	-

<i>R</i>	Rezistor	Ω
<i>RC</i>	Rezonátor (rezistor a kondenzátor)	-
<i>RF</i>	Rádiová frekvence (Radio Frequency)	-
<i>SC</i>	Typ řezu krystalu	-
<i>SCK</i>	Výstup hodinového signálu pro SPI (Serial Clock)	-
<i>SCL</i>	Hodinový vodič pro I2C	-
<i>SDA</i>	Datový vodič pro I2C	-
<i>SMD</i>	Součástky typu SMD (Surface Mount Device)	-
<i>SPA</i>	Spektrální analyzátor (Spectrum Analyzer)	-
<i>SPI</i>	Sériová sběrnice (Serial Peripheral Interface)	-
<i>SS</i>	Výběr zařízení (Slave Select)	-
<i>T</i>	Teplota	$^{\circ}\text{C}$
<i>TCP/IP</i>	Protokol pro řízení přenosu (Transmission Control Protocol/Internet Protocol)	-
<i>TCXO</i>	Krystalový oscilátor teplotně kompenzovaný (Temperature Compensated Crystal Oscillator)	-
<i>U</i>	Napětí	V
<i>USB</i>	Univerzální sériová sběrnice (Universal Serial Bus)	-
<i>vc</i>	Napájecí napětí	V
<i>Vcc</i>	Napájecí napětí	V
<i>VCXO</i>	Krystalový oscilátor doladovaný napětím (Voltage Controlled Crystal Oscillator)	-
<i>VDD</i>	Napájecí napětí	V
<i>VISA</i>	Rozhraní (API) pro komunikaci přístrojů s počítačem (Virtual Instrument Software Architecture)	-
<i>Vref</i>	Referenční napětí	V
<i>vs</i>	Napájecí napětí	V
<i>XTAL</i>	Krystal	-
<i>Z</i>	Impedance	Ω
θ	Úhel řezu krystalu	$^{\circ}$
Φ	Úhel řezu krystalu	$^{\circ}$

1 Úvod

1.1 Vznik diplomové práce

Kvalita a spolehlivost výrobku není jenom o spokojenosti zákazníků, ale tvoří i jméno společnosti. Aby se společnost jako je Rohde&Schwarz dokázaly prosadit na celosvětovém trhu, musely se zaměřit na jakost výrobku a sledování výstupních parametrů. Společnost Rohde&Schwarz vyrábí a prodává inovativní produkty v oblasti měřicí, vysílací a multimediální techniky, zabezpečených komunikací, kybernetické bezpečnosti, a dále v oblasti monitorování a testování sítí. Propracovaný výrobní systém urychluje výrobu a spolehlivě vyhoví požadavkům zákazníka. Pro zajištění kvality vyrobené měřicí techniky potřebuje výrobce monitorovat parametry komponentů, které se v ní nachází. Parametry se zapisují do protokolu a ten je předán zákazníkovi s výrobkem. Vývoj měřicího systému pro ověření výrobku a generování protokolu je komplexní úkon a vyžaduje sehraný pracovní kolektiv. Takovýto tým si musí stanovit cíle projektu a pečlivě naplánovat jeho harmonogram. Výstupním bodem je automatický měřicí systém pro testování zařízení s generováním protokolů, který umožňuje výrobě zajistit požadovanou jakost vyráběných přístrojů a menší zásah lidského faktoru ovlivňujícího kvalitu výroby. Tato diplomová práce se zabývá realizací měřicího systému, který bude testovat OCXO oscilátor a následně bude zapisovat naměřené parametry do protokolu, a to s pomocí speciálních programů a měřicích přístrojů společnosti Rohde&Schwarz.

V této práci se bude používat kombinace anglických a českých zkratk, které odpovídají běžně užívané terminologii v oboru. Použití zkratk má za cíl zjednodušit a zpřehlednit text.

1.2 Cíle diplomové práce

Cílem této diplomové práce je navrhnout a realizovat měřicí přípravek a měřicí systém složený z přístrojů společnosti Rohde&Schwarz pro měření parametrů OCXO oscilátorů. Konkrétními měřenými parametry jsou frekvence, výstupní úroveň a laditelnost. Práce se bude zaměřovat na realizaci tohoto měřicího systému, tj. vytvoření adaptéru, propojení adaptéru s měřicím zařízením, použití měřicích přístrojů a speciálního programového vybavení společnosti Rohde&Schwarz. Výstupem navrženého měřicího systému bude protokol s parametry OCXO oscilátoru a bloková schémata.

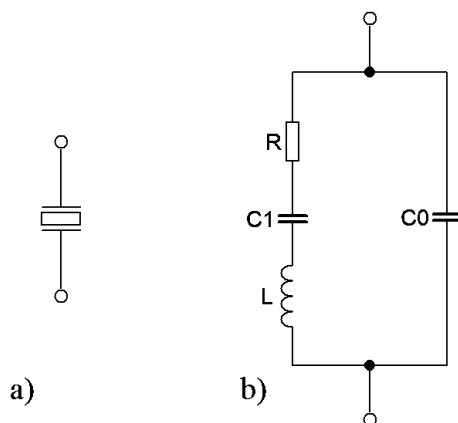
2 Teoretický rozbor

2.1 Oscilátory

Oscilátory tvoří samostatnou skupinu elektrických obvodů. Jsou zdrojem střídavého signálu určitého tvaru a kmitočtu pro další obvody. Mnohé z nich jsou autonomní obvody, tzn. obvody, které vytvářejí signál bez vnější kontroly. Používají se v mnoha odvětvích elektrotechniky, například v radiotechnice, výpočetní technice, měřicí technice a dalších. Oscilátorů je celá řada, např. harmonické, RC, LC, krystalové oscilátory ve známých topologiích jako Meissnerův, Armstrongův, Hartleyův, Colpittsův, Clappův, Vackářův oscilátor atd. [1]

2.1.1 Krystalové oscilátory

Krystalový oscilátor se skládá z krystalu, který tvoří rezonátor, a aktivního obvodu tvořícího odtlumení či podmínky nestabilního zpětnovazebního systému. U mnohých krystalů, např. turmalínu, křemene nebo Seignettovy soli, vyvolává tlak elektrické napětí. Tento efekt se nazývá Piezoelektrický jev. Piezoelektrický krystal může také být vystaven střídavému elektrickému napětí, které způsobí vibrace krystalu. Rezonanční frekvence těchto krystalů se pohybuje od jednotek po stovky MHz. Používají se pro vysoké frekvence, např. hodinových oscilátorů v počítačích, a dále u aplikací s potřebou zvláště vysoké stability frekvence, např. referencích frekvenčních syntezátorů. Pro zvýšení přesnosti a teplotní stability je oscilátor zabudován do tzv. pece, která ho udržuje na stálé teplotě. Tyto oscilátory se nazývají OCXO. Na Obr. 2.1 je schématická značka a náhradní topologie krystalu. [1]



Obr. 2.1 a) schématická značka krystalu, b) náhradní obvod krystalu

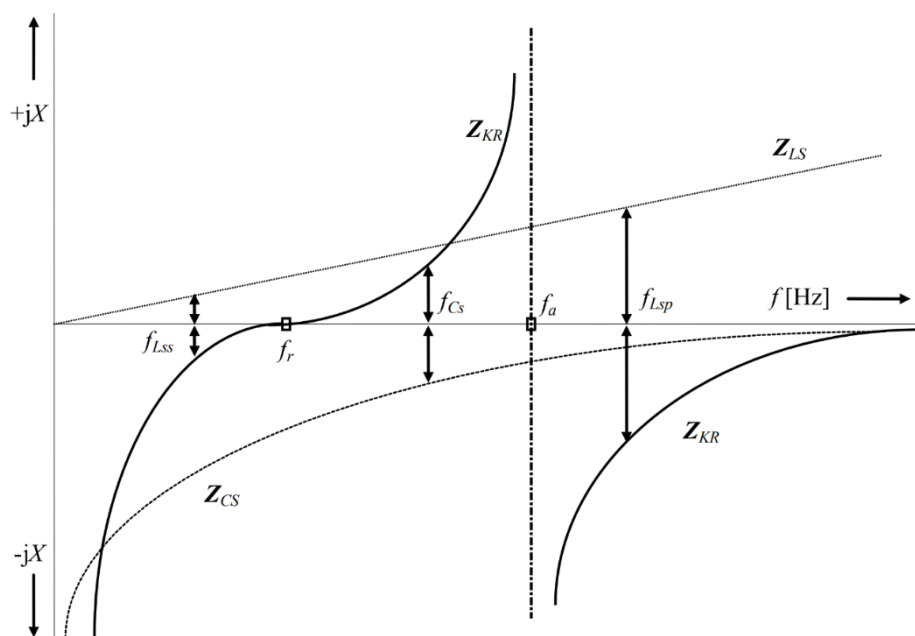
2.1.1.1 Změna rezonanční frekvence

Změna rezonanční frekvence je způsobená přidáním reaktancí. Podstatným parametrem krystalového oscilátoru je vzdálenost kmitočtů sériové a paralelní rezonance, která je dána vztahem (1):

$$\frac{f_a - f_r}{f_r} = \frac{C_1}{2C_0}, \quad (1)$$

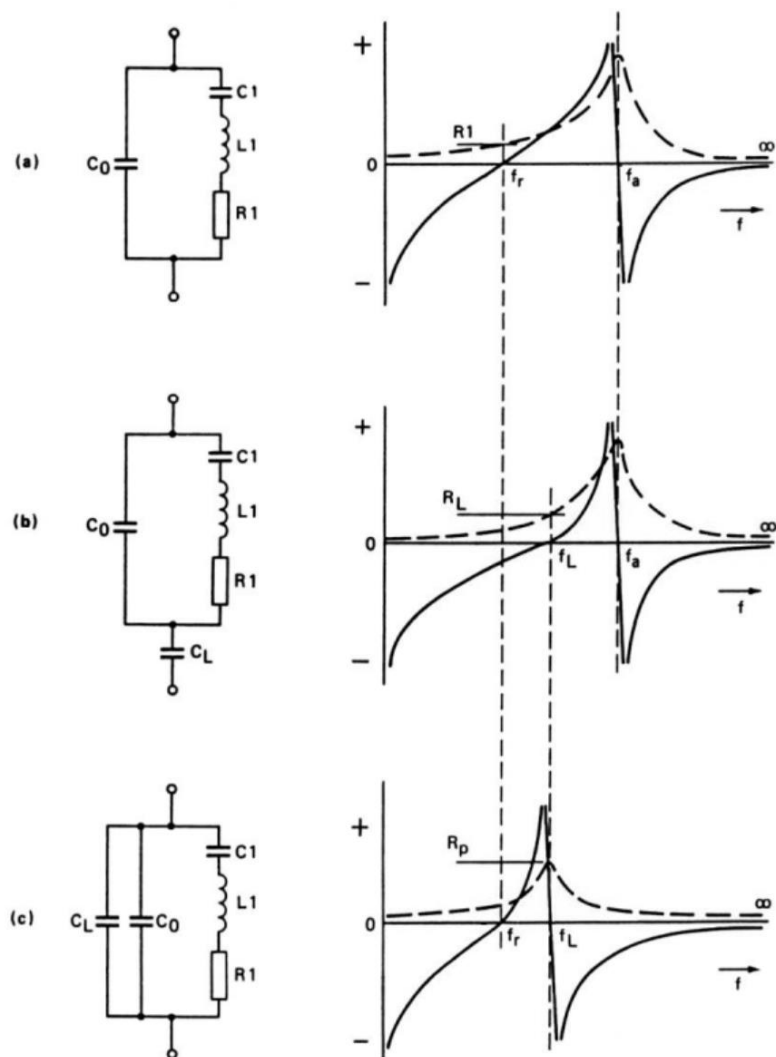
kde f_a je paralelní rezonanční frekvence, f_r je sériová rezonanční frekvence, C_1 je dynamická kapacita a C_0 je statická kapacita držáku. [15]

Rezonance je převážně závislá na geometrii výbrusu a dynamické kapacitě. Dále může být také ovlivněna zatěžovací reaktancí, tedy reaktancí zapojenou sériově nebo paralelně ke krystalu. Změna polohy rezonančních frekvencí je na Obr. 2.2. [15]



Obr. 2.2 Změna rezonanční frekvence způsobenou přidáním reaktancí [15]

V polorovině s kladnou hodnotou reaktancí má zásadní vliv sériová indukčnost a v polorovině se zápornou hodnotou reaktancí má vliv sériová kapacita. Na Obr. 2.3 jsou znázorněny změny sériové a paralelní rezonanční frekvence pro kapacitní reaktance připojené ke krystalu. Pro zjednodušení jsou vyznačeny jen body určující rezonanční frekvence. [15]



Obr. 2.3 Změna rezonanční frekvence krystalu přidáním sériové a paralelní kapacity [15]

2.1.1.2 Piezoelektrické výbrusy a rezonátory

Vlastnosti krystalové jednotky jsou ovlivňovány fyzikálními charakteristikami výchozího krystalického materiálu a způsobem vlastního fyzikálního kmitavého pohybu krystalové destičky. Křemenný výbrus je destička vyříznuta z monokrystalu křemene, která je definovaným způsobem orientována vzhledem k jeho krystalografickým osám. Tento řez destičky je jednoznačně určen úhly, které svírá výchozí poloha řezu s dvěma osami krystalu. [16]

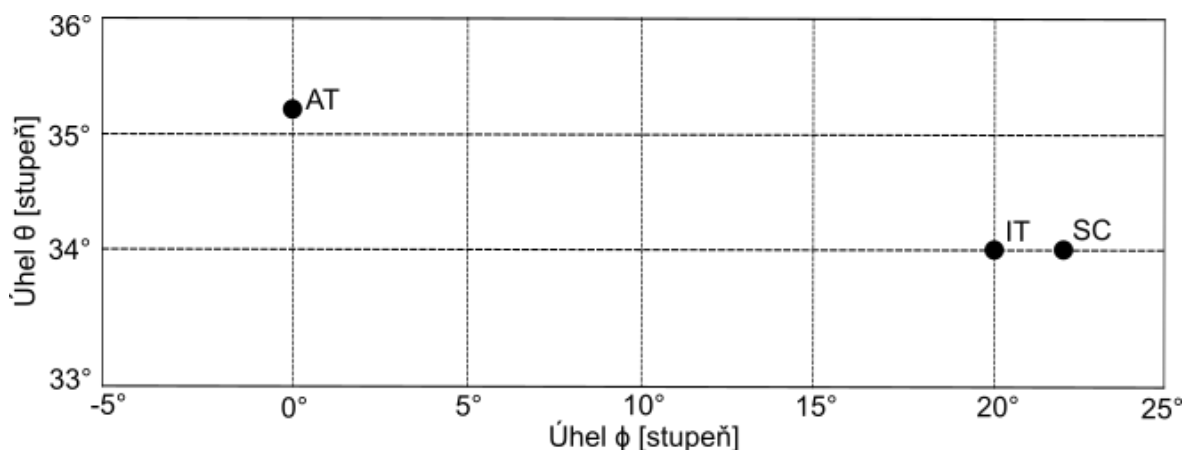
Typy krystalů podle řezu

Většina krystalových oscilátorů s vysokou stabilitou používá broušené krystaly typu AT, v systémech s nejvyšší stabilitou se často používají broušené krystaly typů SC a IT.

Krystalové výbrusy typu AT se používají pro frekvence přibližně mezi 0,5 až 300 MHz. Tvar výbrusu je kruhová destička. Typ kmitu je tloušťkově střížný. Teplotní průběh je kubická parabola kde $T_0 = 25\text{ °C}$. Úhel řezu θ je $35^\circ 05'$ až $35^\circ 25'$.

Broušený krystal SC je jedním z řady dvojité rotovaných krystalů (krystaly křemene jsou broušené pod úhlem vzhledem ke dvěma ze tří krystalografických os). Tyto krystaly poskytují dobrý fázový šum a dobré charakteristiky stárnutí. To jsou vlastnosti, které jsou potřebné pro krystalové oscilátory řízené pecí tedy OCXO. Používají se pro frekvence přibližně mezi 5 až 100 MHz. Tvar výbrusu je kruhová destička. Typ kmitu je tloušťkově střížný. Zde se používají dva řezy. První úhel řezu θ je 34° a druhý Φ je 22° . Teplotní průběh je kubická parabola kde $T_0 = 90\text{ °C}$.

Řez krystalu IT je velice podobný SC. Používají se pro frekvence přibližně mezi 0,5 až 200 MHz. Tvar výbrusu je kruhová destička. Typ kmitu je tloušťkově střížný. Opět se používají dva řezy. První úhel řezu θ je 34° a druhý Φ má 20° . Teplotní průběh je kubická parabola kde $T_0 = 75\text{ °C}$. Porovnání úhlů pro jednotlivé typy řezu najdeme na Obr. 2.4. [16]

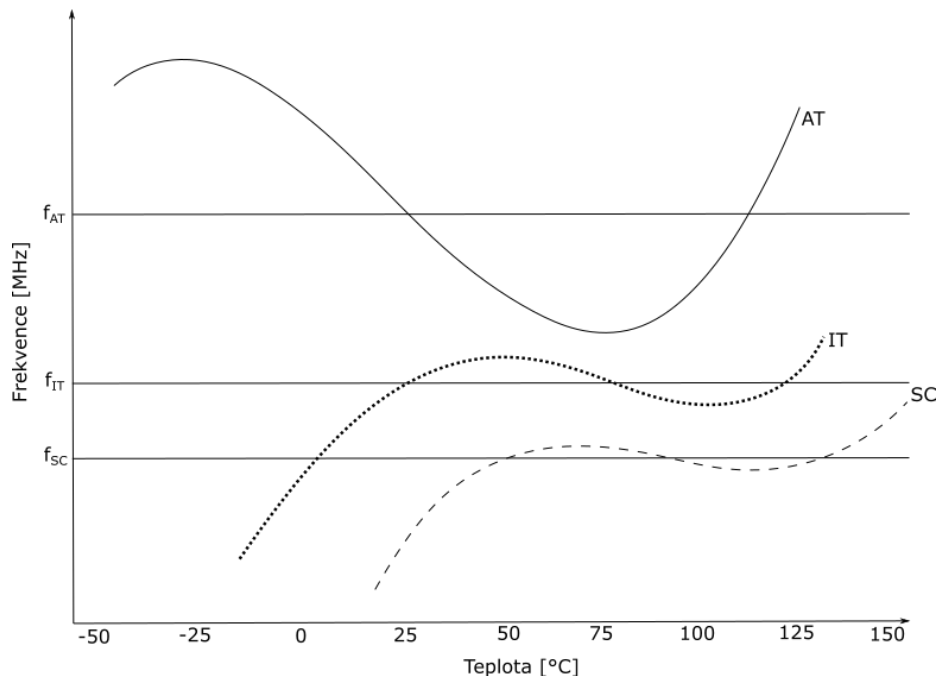


Obr. 2.4 Řezy krystalu AT, SC a IT

Výhoda krystalů SC a IT oproti AT krystalu

1. Zlepšené stárnutí. Pro danou frekvenci poskytuje krystal SC a IT 2:1 až 3:1 zlepšení stárnutí ve srovnání s AT krystaly.
2. Zahřátí. V teplotně stabilizovaných krystalových oscilátorech s danou konstrukcí pece a spínacím výkonem dosáhne krystal SC a IT své výsledné frekvence za podstatně kratší dobu než krystal AT.
3. Zlepšený fázový šum.
4. Vysoká provozní teplota okolí. Na Obr. 2.5 je znázorněná závislost frekvence na teplotě, kde jsou porovnávány charakteristiky krystalů AT, SC a IT. Optimální teplotní rozmezí pro krystaly SC a IT se pohybují mezi 50 °C až 100 °C . Tyto krystaly jsou však vhodné

pro provoz při vyšších teplotách, a proto jsou logickou volbou pro vysoce stabilní oscilátory řízené pecí s maximální provozní teplotou. Je dobré se povšimnout, že křivky SC a IT krystalů jsou při zvýšených teplotách relativně ploché a že jejich frekvence při nízkých teplotách rychle klesá. [16]



Obr. 2.5 Porovnání teplotní závislosti rezonanční frekvence AT, IT a SC krystalů. f_{AT} , f_{IT} , f_{SC} – nominální oscilační frekvence jednotlivých krystalů [7]

5. Vibrace. Když je krystalový oscilátor vystaven vibracím, jsou generovány rušivé frekvence. Amplituda těchto rušivých výstupů souvisí s amplitudou vibrací, mechanickou konstrukcí krystalové podpěry a mechanickou konstrukcí oscilátoru. Krystaly typu SC a IT produkují při vibracích nižší amplitudu rušivého výstupu než AT krystaly. Tato charakteristika je však určena spíše mechanickými konstrukcemi krystalu a oscilátoru než výbrusem krystalu. [16]
6. Orientační citlivost. Když se změní fyzická orientace oscilátoru, dojde k malé změně frekvence. Posun generované frekvence je způsoben změnou napětí na krystalu v důsledku gravitačního vlivu na uchycení krystalu. Krystaly typu SC a IT jsou méně frekvenčně citlivé na změnu orientace než AT krystaly. [16]

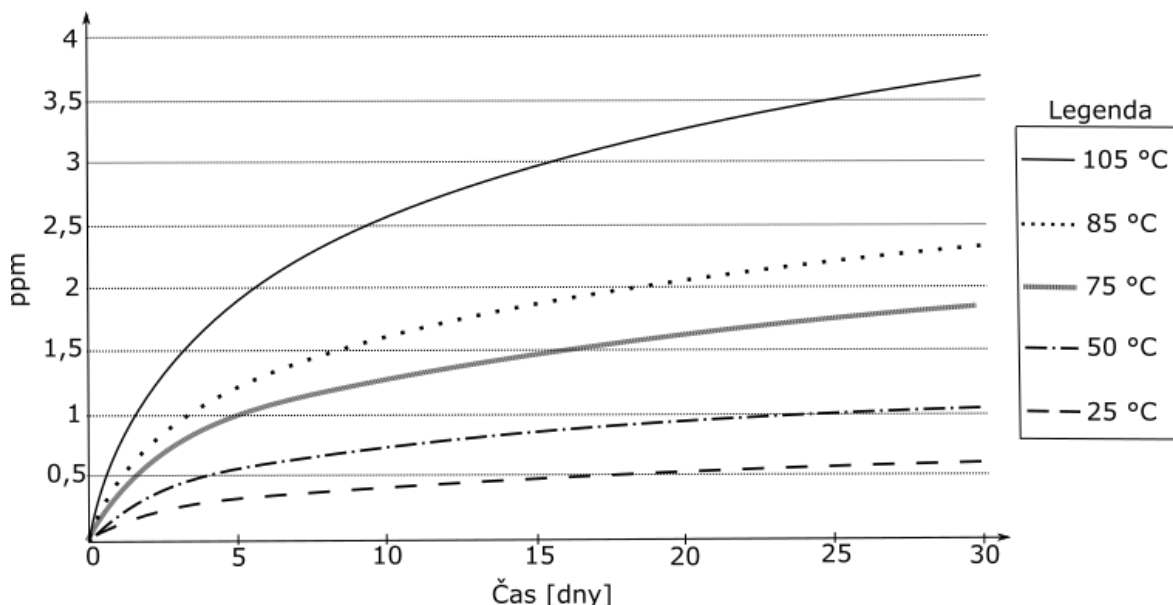
Nevýhody krystalů SC a IT oproti AT krystalu

1. Vysoké náklady. Obtíže spojené s přesně řízenými úhlovými rotacemi kolem dvou os při výrobě SC a IT krystalů způsobují vyšší výrobní náklady oproti jedné ose pro AT krystaly. Proto mají tyto typy krystalů podstatně vyšší cenu než krystaly AT se stejnou frekvencí. [16]

2. Laditelnost. Mění se kapacita krystalu SC a IT je několikrát menší než kapacita AT krystalu stejné frekvence, čímž se snižuje schopnost ladit frekvenci krystalu. To omezuje použití krystalu SC a IT v krystalových oscilátorech teplotně kompenzovaných (Temperature Compensated Crystal Oscillator, TCXO), krystalových oscilátorech doladovaných napětím (Voltage Controlled Crystal Oscillator, VCXO) nebo dokonce v oscilátorech OCXO, které vyžadují posunout frekvenci oscilací o jakýkoli významný stupeň. [16]

2.1.1.3 Stárnutí

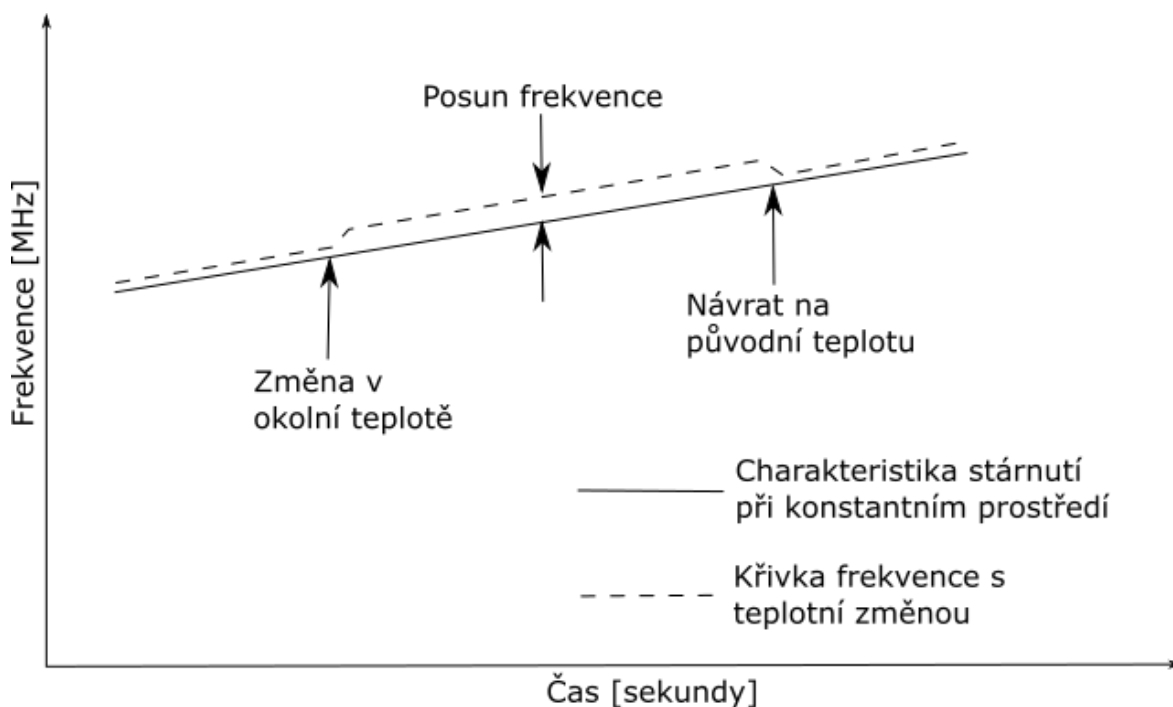
Kontinuální změna frekvence krystalového oscilátoru v závislosti na čase, když jsou všechny ostatní parametry konstantní, se nazývá stárnutí. Na Obr. 2.6 je znázorněno stárnutí oscilátoru. Typicky se provádí u nově vyrobených oscilátorů k továrnímu stárnutí kvůli odstranění největšího vlivu nestability.



Obr. 2.6 Stárnutí oscilátoru: posun frekvence generovaného signálu v závislosti na dnech při různé teplotě

2.1.1.4 Stabilita

Změna okolní teploty způsobuje malou změnu výstupní frekvence. Tento posun frekvence lze znázornit jako odchylku od křivky stárnutí oscilátoru. Tato odchylka od normální charakteristiky stárnutí nesouvisí s časem, ale je způsobena náhlou změnou teploty. Frekvenční posun v závislosti na teplotě je uveden na následujícím Obr. 2.7. [7]



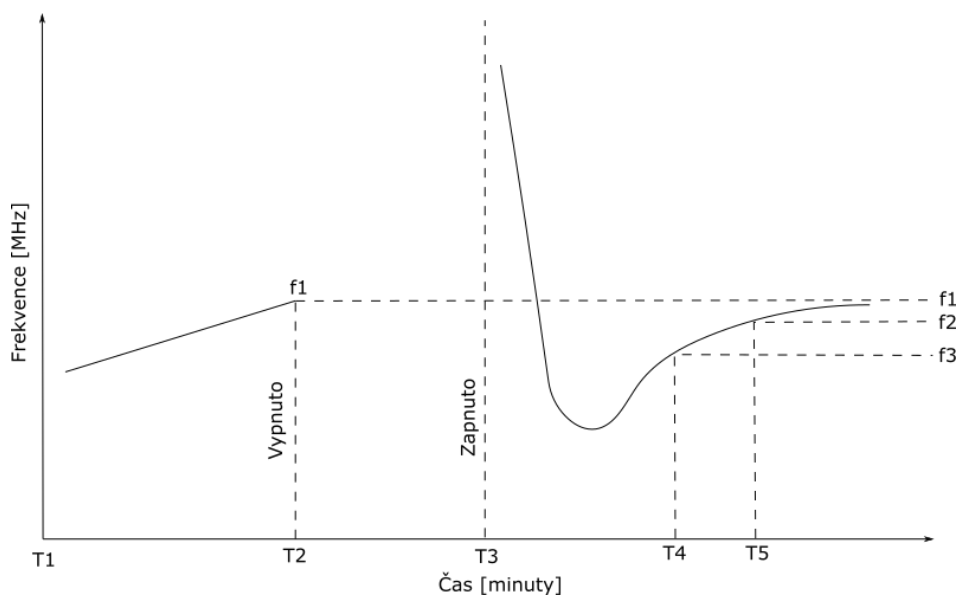
Obr. 2.7 Posun frekvence v závislosti na čase vlivem náhlé změny teploty [7]

Tato změna nevyvolává hysterezní efekty. To znamená, že pokud pak po čase dojde k návratu k původní teplotě, bude konečná frekvence v podstatě taková, jaká by byla, kdyby k žádné změně okolní teploty nedošlo. [7]

2.1.1.5 Restabilizace a retrace

Dalšími důležitými pojmy jsou restabilizace a retrace. Když je krystalový oscilátor na určitou dobu vypnutý a poté znovu uveden do stavu zapnuto, pak krystal vyžaduje dobu restabilizace. Tato doba má charakteristiku podobnou k počáteční charakteristice stárnutí z výroby. Vysoké stability je ale dosaženo podstatně rychleji.

Ve většině aplikací jsou OCXO nepřetržitě napájeni. V tomto případě je stárnutí důležitou charakteristikou, přičemž charakteristika vypnutí/zapnutí má malý nebo žádný význam. Některé aplikace však vyžadují, aby byly krystalové oscilátory často vypínány a znovu zapínány. Pro tyto aplikace je potřeba uvažovat další řadu charakteristik. Na Obr. 2.8 je charakteristika oscilátoru po zapnutí a vypnutí. [7]



Obr. 2.8 Stabilizace oscilátoru po zapnutí a vypnutí [7]

Na Obr. 2.8 můžeme vidět, že oscilátor je nabuzen do času T2. Poté je na určitou dobu vypnutý a znovu zapnutý (v čase T3). Většinou jsou pak řešeny tři parametry.

1. Retrace je chyba ustálení po definované době od opětovného zapnutí. Chyba v definovaném okamžiku T4 je dána vztahem (2):

$$ERR_{T4} = f1 - f3, \quad (2)$$

kde f1 je frekvence v okamžiku T2 a f3 je frekvence v okamžiku T4 (T4-T3 sekund po opětovném zapnutí).

2. Restabilizace je zahřívací charakteristika, která udává rychlost změny frekvence po ustálení pece. Míra restabilizace je definována od T4 do T5 vztahem (3):

$$\text{Restabilizace}_{T5-T4} = \frac{f3 - f2}{T5 - T4}, \quad (3)$$

kde f3 a f2 jsou frekvence. T4 a T5 jsou časové okamžiky.

3. Doba stárnutí je, jak dlouho trvá oscilátoru, než dosáhne stanovené rychlosti stárnutí po specifikované době vypnutí. [7]

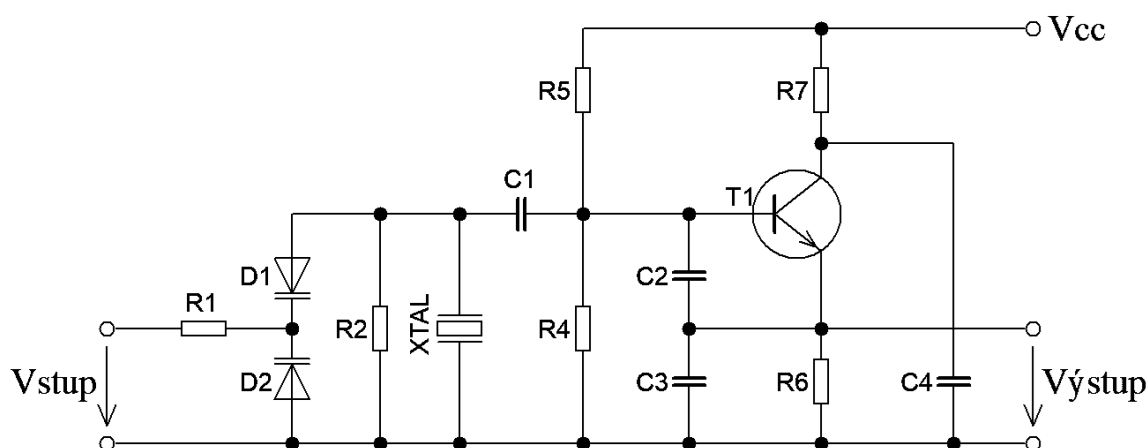
Správný návrh obvodu a výběr komponent minimalizuje vliv těchto parametrů, přičemž hlavními faktory jsou výběr typu krystalu a požadované doby stabilizace po zapnutí oscilátoru. V těchto charakteristikách existují značné rozdíly mezi krystaly. Tyto rozdíly by měly být blíže specifikovány pouze tehdy, je-li to nezbytně nutné, a pak pouze v potřebné míře, protože specifikace v této oblasti mohou mít veliký dopad na cenu oscilátoru. Tyto vlastnosti mají malý význam u oscilátorů, které jsou trvale napájeny. [7]

2.1.2 VCXO – Krystalový oscilátor dolad'ovaný napětím

Krystalové oscilátory typu VCXO jsou součástky nebo moduly, které poskytují signál se stálou frekvencí, kterou lze nastavit nízkým napětím. Velké využití mají v radiofrekvenčních (Radio Frequency, RF) obvodech, kde je potřeba stabilní frekvence. Protože mají vysokou stabilitu s nízkou úrovní šumu, dají se použít např. jako referenční signál v elektronickém systému.

Základním prvkem VCXO oscilátoru je krystal s elektronikou pro doladění frekvence. Toho lze dosáhnout pomocí varikapových diod. Před krystal se umístí tyto diody katodami k sobě. Přepětí působí na anody diod, které pak fungují jako proměnný kondenzátor.

Řízení výstupní frekvence závisí na řadě faktorů, např. použité velikosti dolad'ovací kapacity, samotných podmínek obvodu a na vlastnostech krystalu. Pro řízení většího rozsahu frekvence se do obvodu může zařadit indukčnost. Na Obr. 2.9 je zobrazen základní obvod VCXO. [4]

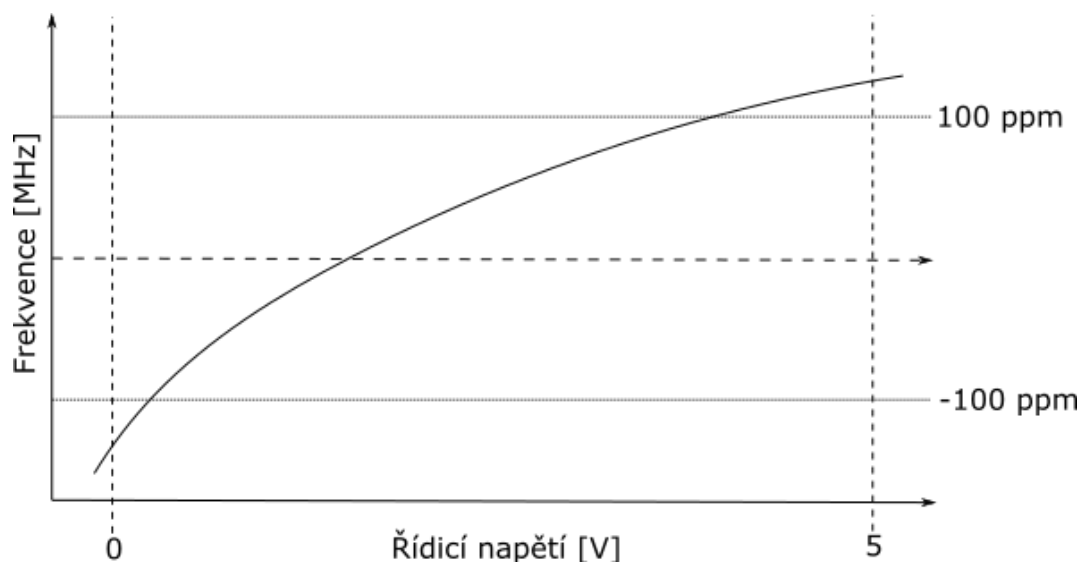


Obr. 2.9 Základní schéma zapojení VCXO [4]

Charakteristickými parametry pro VCXO jsou řídicí napětí, rozsah laditelnosti, převodní funkce, linearita, míra modulace, stabilita, fázový závěs a základní frekvence oscilátoru. [4]

2.1.2.1 Řídicí napětí

Proměnlivé řídicí napětí, které je přivedeno na vstupní svorky, způsobuje změnu frekvence oscilátoru. V některých případech se označuje řídicí napětí jako modulační napětí, zejména pokud je vstupní signál střídavý. Na Obr. 2.10 je řídicí napětí, které nastavuje frekvenci. [3]



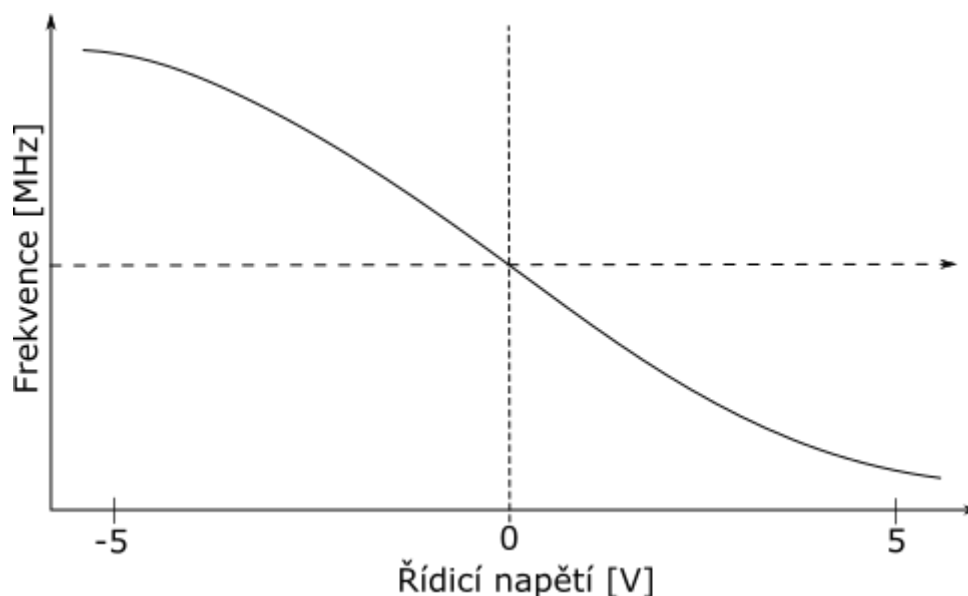
Obr. 2.10 Závislosti výstupní frekvence na řídicím napětí [3]

2.1.2.2 Rozsah laditelnosti

Maximální odchylku frekvence oscilátoru od nominální frekvence, kterou lze ovlivnit řídicím napětím nazýváme rozsah laditelnosti (horní a spodní). Na Obr. 2.10 je znázorněný laditelný rozsah (ppm). [3]

2.1.2.3 Polarita převodní funkce

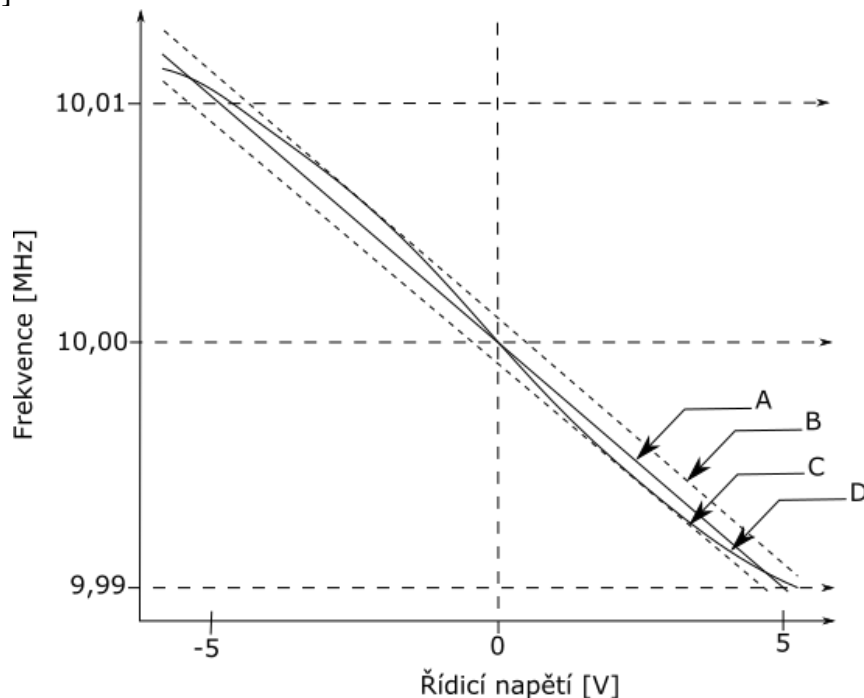
Polarita převodní funkce popisuje závislost frekvence na řídicím napětí. Rozlišujeme dva druhy převodních funkcí. První je kladná polarita převodní funkce, tzn. že se zvýšením řídicího napětí frekvence roste (Obr. 2.10). Druhým je záporná polarita převodní funkce, tj. při zvyšování řídicího napětí frekvence klesá (Obr. 2.11). [3]



Obr. 2.11 Negativní polarita převodní funkce [3]

2.1.2.4 Linearita

Odchylku laditelnosti od lineární závislosti označujeme jako linearitu oscilátoru. Výrobce tento parametr udává, aby definoval možnosti chyby modulačního napětí. Na Obr. 2.12 je linearita. [3]



Obr. 2.12 Linearita [3]

Pokud je v katalogovém listu specifikováno, že oscilátor má linearitu $\pm 5\%$, pak na 20 kHz se může výstupní frekvence v závislosti na řídicím napětí lišit o ± 1 kHz. Přímka A znázorňuje ideální lineární průběh frekvence v závislosti na řídicím napětí. Čárkovaná přímka B a C jsou limity stanovené výrobcem, ve kterých se musí pohybovat křivka D. Ta představuje skutečnou charakteristiku VCXO v rozmezí $\pm 5\%$. [3]

2.1.2.5 Modulační rychlost

Modulační rychlost je definovaná jako maximální modulační frekvence, která produkuje demodulovaný signál nižší o 3 dB než modulační signál. Někdy je také označovaná jako laditelný rozsah frekvenční odezvy. Udává rychlost, se kterou se může měnit řídicí napětí, které pak má za následek změnu frekvence. Měří se připojením sinusového signálu, jehož maximální hodnota odpovídá specifikovanému řídicímu napětí. V případě bez krystalových oscilátorů lze modulovat velmi vysokou rychlostí, ale v případě VCXO je modulační rychlost omezena fyzickými vlastnostmi krystalu. [3]

2.1.3 TCXO – Krystalový oscilátor teplotně kompenzovaný

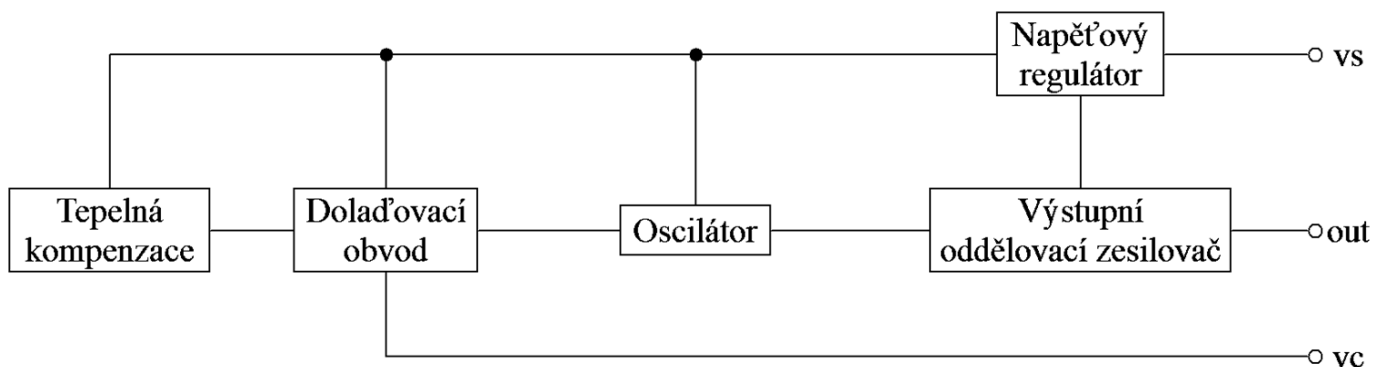
Krystalové oscilátory typu TCXO jsou oscilátory s kompenzací teploty. Jsou nezbytné, v aplikacích, kde je požadovaná úroveň teplotní stability, které nelze dosáhnout standardním krystalovým oscilátorem nebo VCXO. Teplotní stabilita je charakteristikou, která znázorňuje změny frekvence oscilátorů v závislosti na teplotě a je definována dvěma způsoby.

- 1) Je definovaná maximální odchylka frekvence od nominální hodnoty při definované teplotě okolí.
- 2) Je definovaný rozsah mezi maximální a minimální hodnotou oscilační frekvence.

TCXO jsou stabilnější než VCXO, protože lze získat až 40x lepší teplotní stabilitu se stejnou spotřebou energie a s požadavky na prostor na desce plošných spojů (DPS). Oscilátory tohoto typu jsou střední cestou teplotní stability. Tím je myšleno, že jsou lepší než VCXO, ale zase horší než OCXO. Z pohledu ceny a energetické náročnosti jsou lepší než OCXO. [6]

2.1.3.1 Princip TCXO

Obvod pro tepelnou kompenzaci je jednou z hlavních částí celého systému ladění frekvence. Snímá okolní teplotu a přenastavuje doladovací obvod, což způsobí doladění frekvence na nominální hodnotu. Základní obvod oscilátoru a výstupní obvod je stejný jako u VCXO. Na Obr. 2.13 je blokové schéma zapojení TCXO.

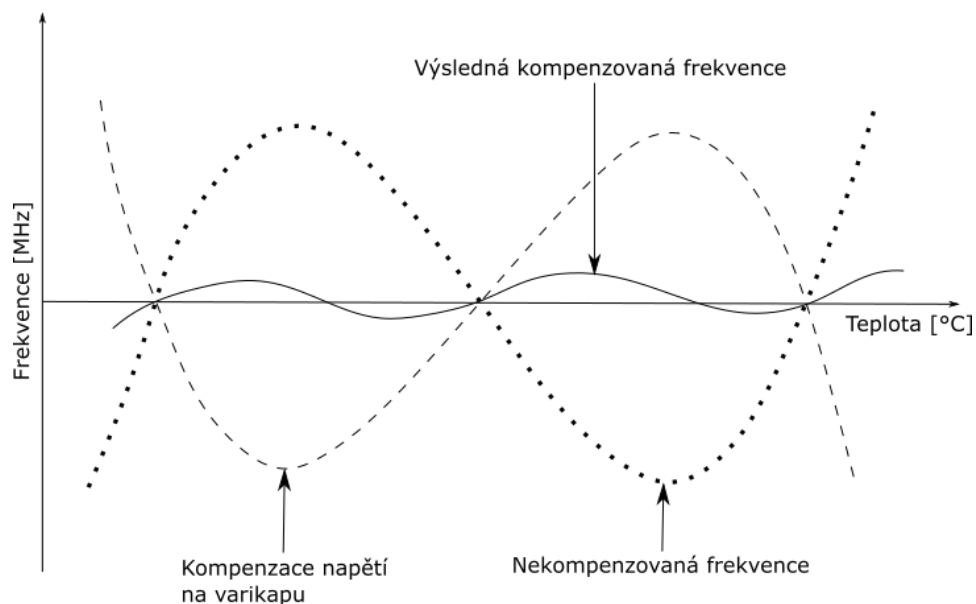


Obr. 2.13 Blokové schéma zapojení TCXO [6]

2.1.3.2 Teplotní kompenzace

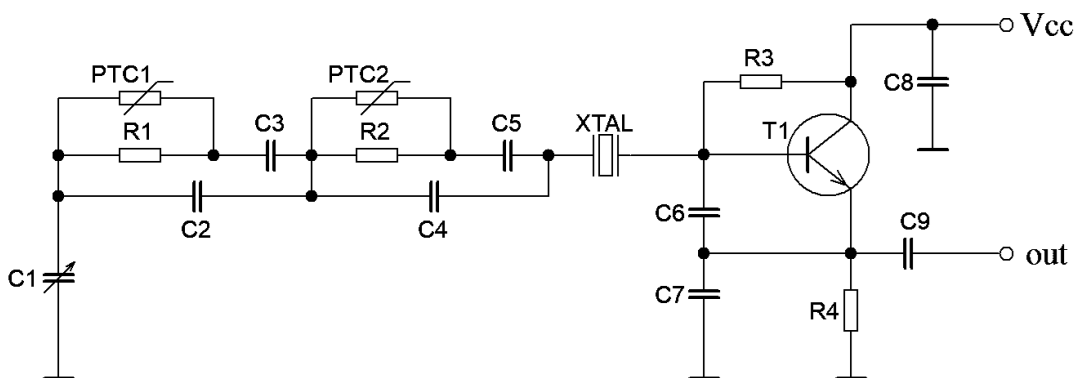
Na Obr. 2.14 je ilustrace obvyklého průběhu teplotní kompenzace. Cílem kompenzační sítě je vytvořit řídicí napětí pro doladovací obvod, které působí proti frekvenčnímu posunu způsobenému změnou teploty. Záměrem je potlačit vliv teplotní změny rezonanční frekvence krystalu. Na obrázku vidíme ilustrační průběh frekvence v závislosti na teplotě

(tečkovaná křivka). Kompenzační napětí, které je přivedené na varikap, je vyobrazeno čárkovanou křivkou. Frekvence signálu generovaného celým obvodem v závislosti na teplotě je vynesena plnou čarou. [6]



Obr. 2.14 Teplotní kompenzace TCXO [6]

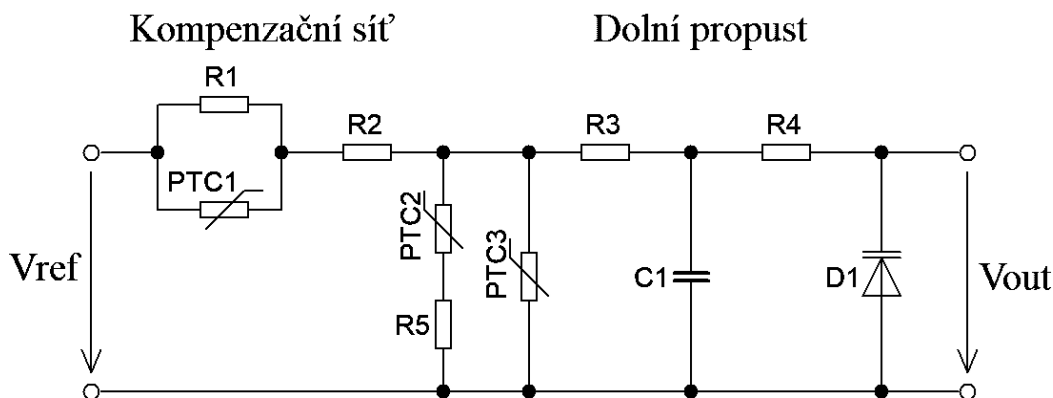
Obvodové řešení kompenzace je možno provést různými způsoby. Jednou možností je použít přímou kompenzaci, ve které je síť termistorů, kondenzátorů a rezistorů. Na Obr. 2.15 je zobrazeno schéma přímé kompenzace. [6]



Obr. 2.15 Schéma zapojení přímé kompenzace [6]

Změna teploty způsobí změnu odporu na termistorech (PTC1 a PTC2), což vyvolá změnu sériové kapacity sítě a kapacitního zatížení krystalu. Tímto procesem se upraví frekvence na oscilátoru. [6]

Další možností je nepřímá kompenzace, která je na Obr. 2.16.



Obr. 2.16 Schéma zapojení nepřímé kompenzace [6]

Zde se používá také síť termistorů (PTC1, PTC2 a PTC3) a rezistorů (R1, R2 a R5) k vytvoření napětí, které je závislé na teplotě. Výstupní napětí kompenzační sítě je filtrováno dolní propustí a přivedeno na varikap. Změna kapacity varikapu vede ke změně frekvence. [6]

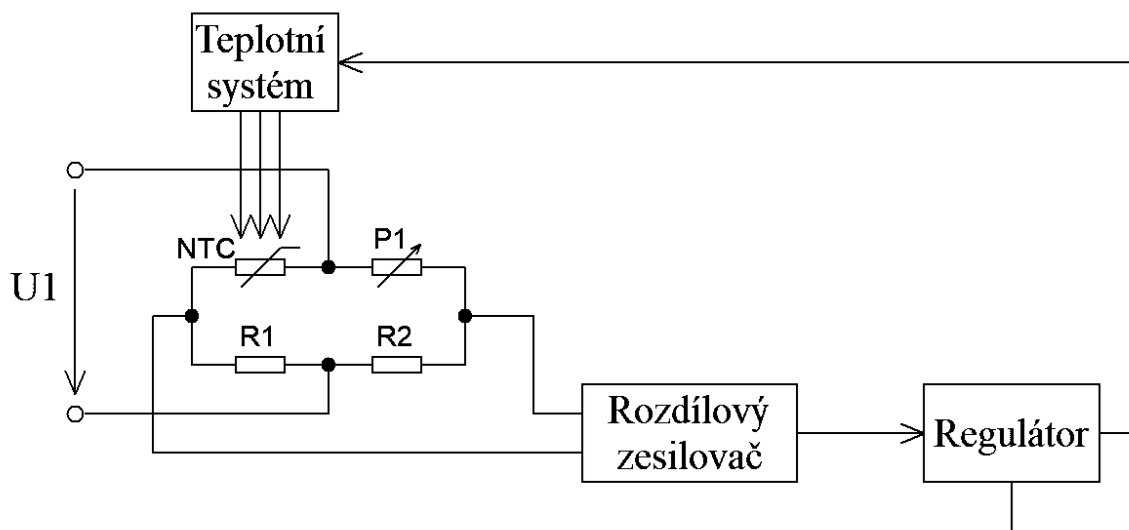
Současným a nejpoužívanějším způsobem je integrace kompenzační sítě. Hlavní roli zde přebírá sada operačních zesilovačů, které opět přivádí budicí napětí na varikap, které působí na krystal a ten změní frekvenci. Tyto zesilovače jsou často označovány jako digitálně řízené analogové kompenzace. [6]

2.1.4 OCXO – Teplotně stabilizovaný krystalový oscilátor

Pokud jsou velké požadavky na stabilitu a přesnost, které oscilátory TCXO a VCXO nedokážou splnit, v takovém případě použijeme přesnější OCXO. Blokové schéma je podobné jako pro TCXO s tím rozdílem, že v tomto případě se neuplatňuje kompenzační síť, ale elektronicky řízená pec, která udržuje stálou teplotu krystalu a tím stabilizuje oscilátor.

2.1.4.1 Proporcionální řízení pece

Proporcionální řízení pece je elektrický systém, který nepřetržitě reguluje příkon pece. Aby průběžně vyrovnával změny okolní teploty, musí měnit okamžitý výkon ohřevu v peci. U oscilátorů tohoto typu je termistor vložen do pouzdra OCXO, aby snímal vnitřní teplotu oscilátoru. Termistor je zapojen do odporového můstku. Na Obr. 2.17 je proporcionální řízení pece. [7]

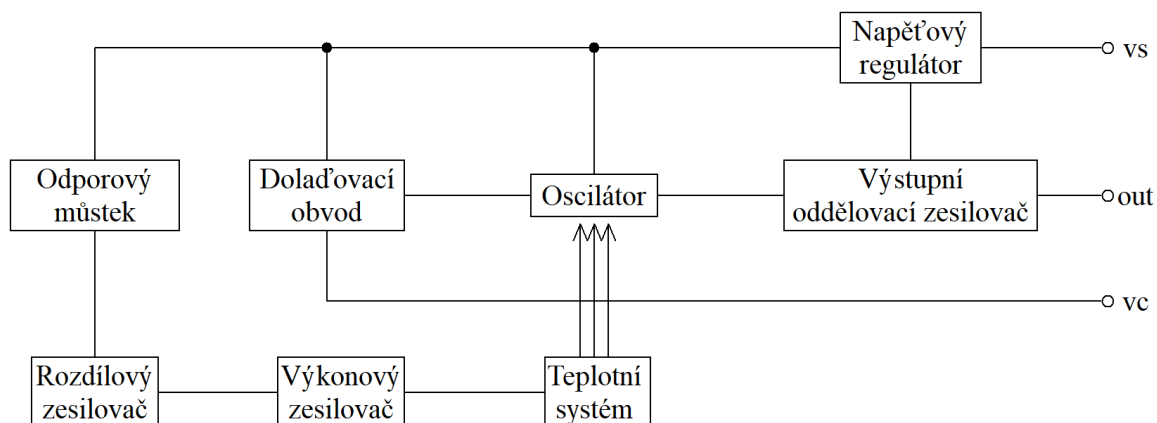


Obr. 2.17 Proporcionální řízení pece OCXO [7]

Princip odporového můstku je založen na tom, že pokud se teplota v peci sníží v důsledku změny okolní teploty, pak změna odporu termistoru způsobí nevyváženost můstku. Následně dojde ke zvýšení výstupního napětí na můstku. Toto napětí je zesíleno rozdílovým zesilovačem s vysokým ziskem. Výstup rozdílového zesilovače je dále zesilován ve výkonovém zesilovači a poté je výstup zesilovače přiveden na vstup pece. Při malém zvýšení napětí, způsobeném nevyvážeností můstku, dojde ke generování velkého napětí v peci. Toto zvýšení výkonu generuje více tepla, které následně kompenzuje pokles teploty, původně snímané na termistoru. [7]

Použití proporcionálního řízení pece zlepšuje stabilitu teploty oscilátoru více než 5000krát oproti krystalu bez pece. Tento řídicí systém není ovšem bezchybný, protože zisk v otevřené smyčce není nekonečný. Stabilitu frekvence OCXO mohou měnit vnitřní teplotní gradienty uvnitř pece nebo obvody mimo teplotní pec, které jsou vystaveny změnám okolní teploty. [7]

Topologické uspořádání obvodu pro OCXO je možné vidět na Obr. 2.18. Doladovací obvod udržuje hrubou výstupní hodnotu oscilátoru. Pec tepelně doladí výstupní hodnotu oscilátoru s vysokou přesností. [7]

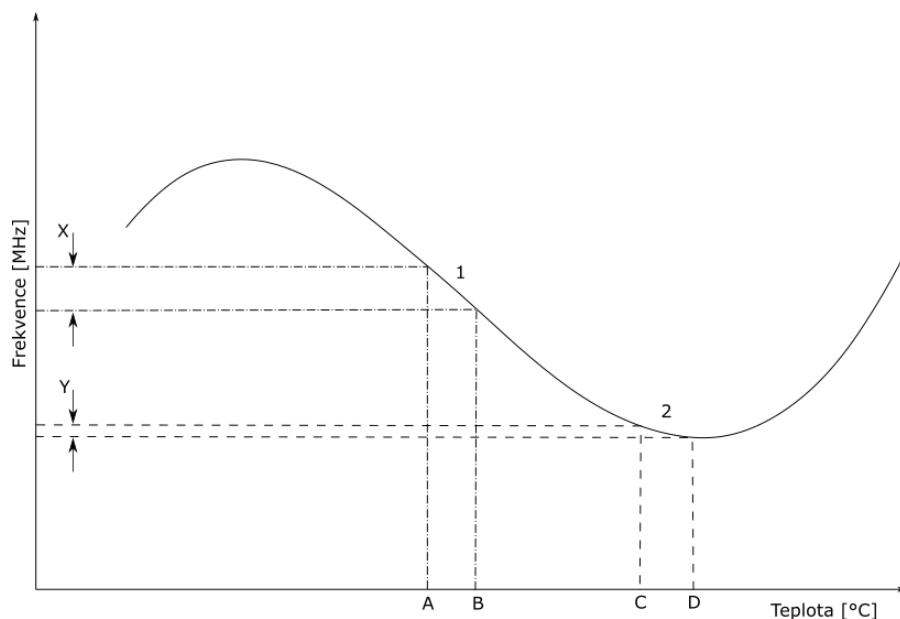


Obr. 2.18 Blokové schéma OCXO

V případě požadované vyšší teplotní stability než té, které lze dosáhnout se standartní proporcionalně řízenou pecí, lze použít systém dvojité pece. Pece jsou uspořádané tak, že jedna pec je uvnitř druhé pece. Vnější pec tlumí změny okolní teploty a vnitřní pec obsahuje obvod oscilátoru. [7]

2.1.4.2 Nastavení teploty na OCXO

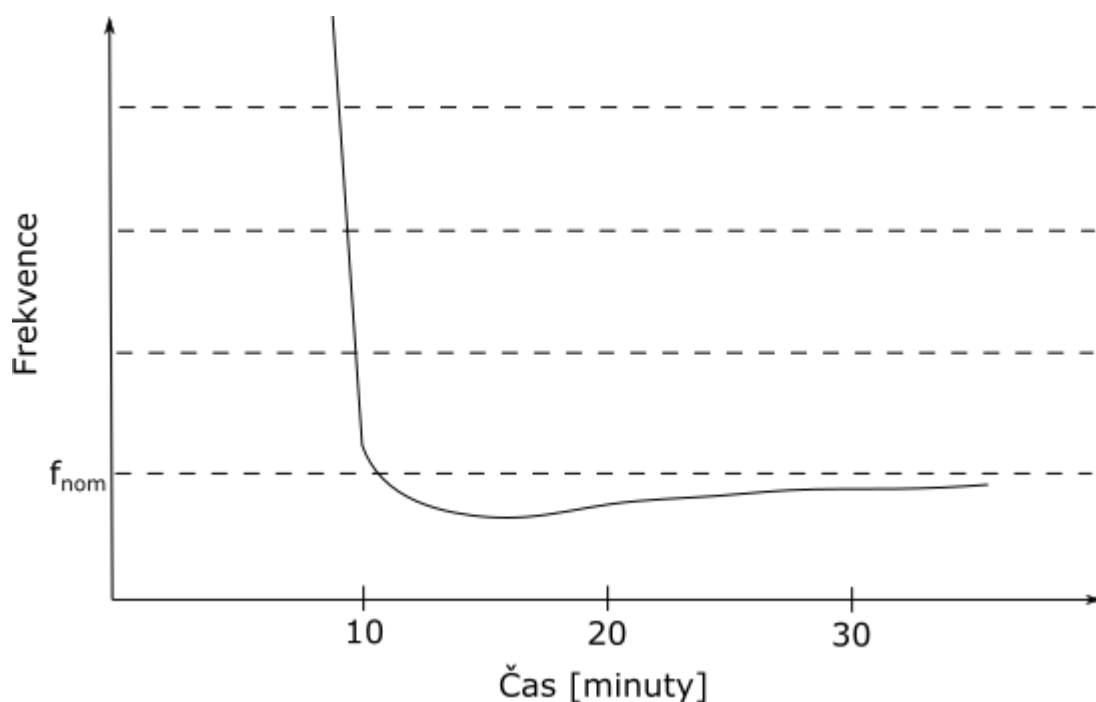
Pro lepší představu nastavení teploty je uveden Obr. 2.19 závislost frekvence na teplotě. Pokud by byla teplota pece nastavena na bod (1) a změna okolní teploty by se pohyboval z bodu A do bodu B, pak by došlo ke změně frekvence o velikosti X. Pokud by však byla teplota pece nastavena na bod (2), stejná změna teploty od C až do D by měla za následek výrazně sníženou změnu frekvence o velikosti Y. Takového nastavení lze dosáhnout pomocí termistoru v odporovém můstku znázorněného na Obr. 2.17. [7]



Obr. 2.19 Ladění výstupní frekvence OCXO v závislosti na teplotě uvnitř pece [7]

2.1.4.3 Prvotní stabilizace frekvence

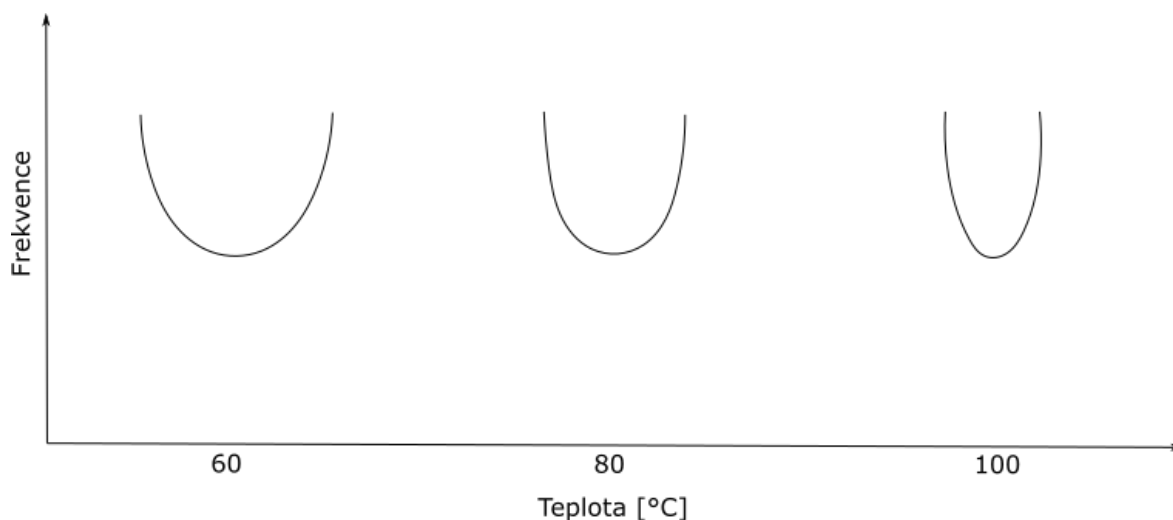
Když je oscilátor zpočátku zapnutý při pokojové teplotě, je frekvence vyšší než poté, co se pec stabilizuje. Jak se pec zahřívá, frekvence krystalu rychle klesá. U standardních oscilátorů se pec vyrovná za 10–15 minut, ale díky vlastnostem krystalu se před úplnou stabilizací doladí konečná frekvence. Na Obr. 2.20 lze vidět relativně vysoký stupeň stability zhruba tak po 30 minutách po zapnutí. Před 10. minutou, kde očekáváme danou hodnotu stabilizace, frekvence klesne pod požadovanou hodnotu a v dalších minutách se stabilizuje na požadovanou hodnotu s maximální přesností. [7]



Obr. 2.20 Znáznornění stabilizace frekvence oscilátoru po jeho zapnutí. f_{nom} – nominální frekvence oscilátoru [7]

2.1.4.4 Minimální frekvence v daném teplotním rozsahu

Provozní teplota pece je o několik stupňů vyšší než nejvyšší okolní teplota, ve které oscilátor pracuje. Tímto si pec udrží velice dobrou stabilitu. Jsou zde však nevýhody s provozem pece s vysokou teplotou. Čím je větší provozní teplota T_0 tím má charakteristika ostřejší tvar, což vede k větší citlivosti při nepatrných změnách okamžité teploty. Na Obr. 2.21 jsou vidět tyto charakteristiky. [7]



Obr. 2.21 Minimální frekvence v daném teplotním rozsahu [7]

Druhou nevýhodou je stárnutí krystalu. Se zvyšující teplotou krystal rychleji degraduje. Proto při výběru OCXO je třeba volit kompromis pro určování požadované provozní teploty pece. Provozní teplota by měla být co nejnižší, ale musí být taky dostatečně vysoká, aby poskytovala dobré vlastnosti. [7]

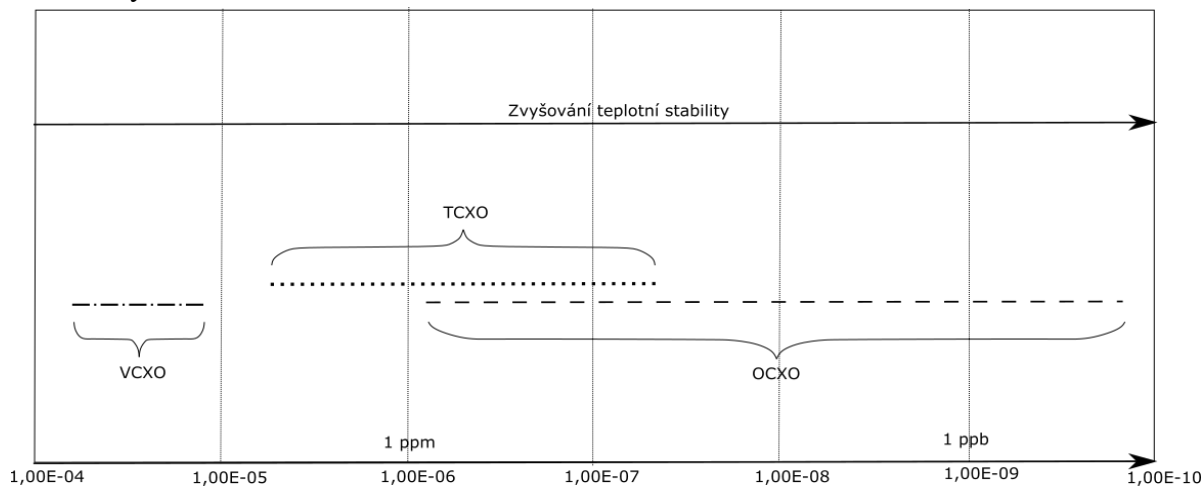
2.1.5 Porovnání vlastností VCXO, TCXO a OCXO

Pro porovnání parametrů jednotlivých typů krystalových oscilátorů je zde uvedena Tab. 2.1, která srovnává parametry oscilátorů o společné frekvenci 10 MHz.

Tab. 2.1 Tabulka základních parametrů krystalových oscilátorů [8][9][10]

	VCXO	TCXO	OCXO
Typ	VX-501	VT-800	OX-204
Frekvence (MHz)	10–1200	10-40	10
Napájecí napětí (V)	3,3–5	2,8-5	11,4-12,6
Proudový odběr (mA)	30–40	1,5-2,5	150
Teplotní stabilita (°C)	-40–85	-40-85	-55-95
Fázový šum pro 100 kHz (dBc/Hz)	-161	-150	-178
Výstupní signál	Sinusový	Sinusový	Sinusový
Rozměr (mm)	2,8x2,8	5x3,2	25x25
Váha (g)	2	0,06	20

Dále lze vypořádat zásadní rozdíly na Obr. 2.22, kde je vidět teplotní stabilita jednotlivých krystalových oscilátorů. S rostoucí teplotou se zhoršuje stabilita. V případě OCXO jde o rozsahy laditelnosti velice nepatrné. Proto patří mezi velice přesné krystalové oscilátory.



Obr. 2.22 Rozsah teplotní stability různých typů oscilátorů [6]

2.1.5.1 Možné aplikace krystalových oscilátorů a jejich vlastnosti

Podle požadované výstupní frekvence lze použít různé druhy zapojení oscilátorů. V Tab. 2.2 je rozdělení oscilátoru a v Tab. 2.3 je seznam zkratk různých zapojení.

Tab. 2.2 Možné aplikace krystalových oscilátorů v různém frekvenčním rozsahu

Frekvence	VCXO	TCXO	OCXO
500 kHz – 8 MHz	DIV	DIV	Q (GW, OT)
3 MHz – 35 MHz	Q (GW)	Q (GW)	Q (GW, OT)
30 MHz – 200 MHz	Q (OT), HFF, MULT	Q (OT), HFF, MULT	Q (OT) nebo MULT
150 MHz – 300 MHz	HFF nebo PLL	HFF nebo PLL	-
300 MHz – 2,5 GHz	PLL	PLL	-

Tab. 2.3 Význam zkratk

Význam zkratky	Zkratka
Oscilátory pracující s vyšší harmonickou	OT
Oscilátory s frekvenční děličkou	DIV
Oscilátory pracující se základní harmonickou	GW
Oscilátory pro vysoké frekvence pracující na základní harmonické	HFF
Oscilátory s frekvenčním násobičem	MULT
Oscilátory s fázovým závěsem, analogové nebo digitální	PLL

Výhody a nevýhody různých zapojení jsou popsány v následující Tab. 2.4.

Tab. 2.4 Výhody a nevýhody pro různé aplikace

Zapojení	Výhody	Nevýhody
OT	Vysoký činitel jakosti, jednoduší zapojení/nízký počet součástek	Malá laditelnost, proto pouze omezené použití pro VCXO a TCXO
HFF	Není nutné speciální zapojení pro funkci.	Krystalová technologie, náklady, dostupnost, nižší kvalita, vyšší stárnutí
MULT	Lze použít krystaly nižší frekvence	Složitější zapojení, zvýšený fázový šum a jitter
PLL	Střední složitost obvodu při použití digitálního detektoru, vysoká složitost s diskrétní analogovou konstrukcí, jednoduchost nastavení	Zvýšený fázový šum a jitter, velmi špatné pro digitální PLL a pro mnoho PLL-ICs

2.2 Číslicově-analogový převodník

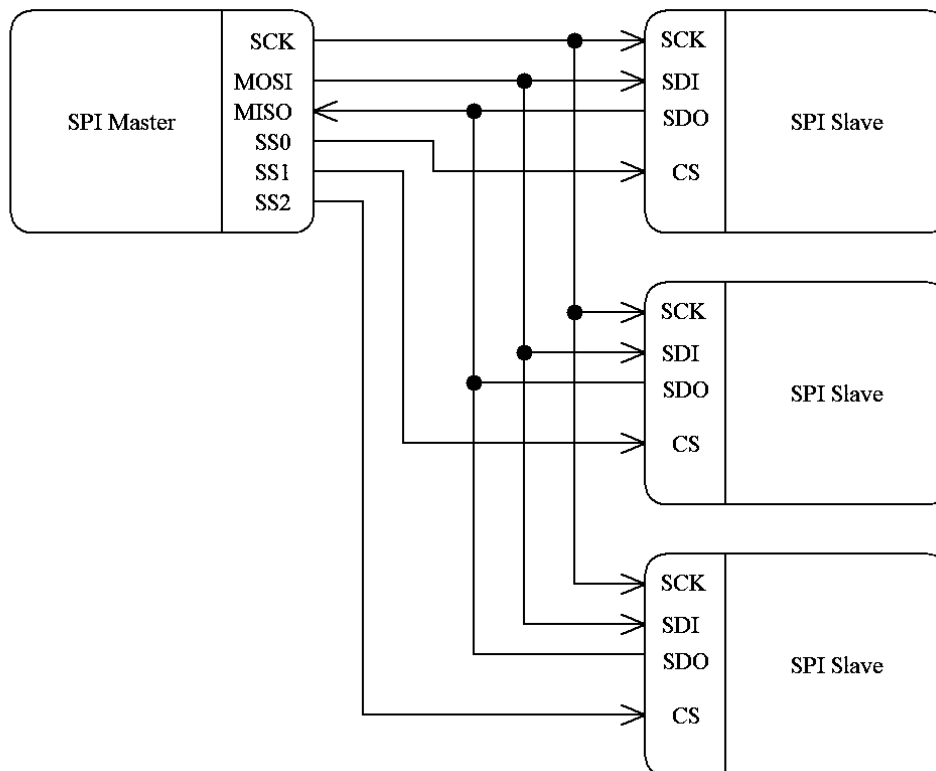
Číslicově-analogový převodník se označují zkratkou DAC (Digital Analog Converter), můžeme se, ale setkat i s D/A nebo Č/A. Digitální signál je reprezentován binárním číslem a je transformován na analogový signál. Číslicově-analogové převodníky jsou založeny na principech převodu diskrétní hodnoty na analogový signál. Analogová hodnota je většinou v podobě napětí nebo proudu. Vyskytuje se chyba způsobená diskrétními úrovněmi výstupního signálu. Tato chyba se nazývá kvantizační chyba. Počet hodnot výstupního napětí je dána rozlišovací schopnost DAC převodníku. [11]

2.3 Sériové sběrnice

Sériové sběrnice slouží pro vzájemné propojení dvou nebo více komunikačních uzlů. Přenos dat probíhá po datových vodiči sekvenčně, v kombinaci s ostatními řídicími signály.

2.3.1 SPI (Serial Peripheral Interface)

Jednu z forem sériové externí sběrnice může být sběrnice SPI. Hlavním členem je tzv. Master a ostatní uzly se nazývají Slave. Master obsahuje generátor hodinového signálu, který je rozváděn do ostatních uzlů, čímž je umožněn zcela synchronní datový přenos. Hodinový signál je veden vodičem, který se označuje zkratkou SCK (Serial Clock). Kromě tohoto hodinového vodiče jsou uzly propojeny dvojicí vodičů označovaných MISO (Master Input Slave Output) a MOSI (Master Output Slave Input). Díky těmto vodičům se data přenáší oběma směry. Posledním signálem na této sběrnici je signál SS (Slave Select, někdy označován jako CS, Chip Select). Ten slouží k výběru určitého uzlu pracujícího v režimu Slave. Pouze Master a zařízení s aktivním signálem SS smí komunikovat po sběrnici. Pro lepší názornost je propojení na Obr. 2.23. [12]



Obr. 2.23 SPI sběrnice blokové schéma [12]

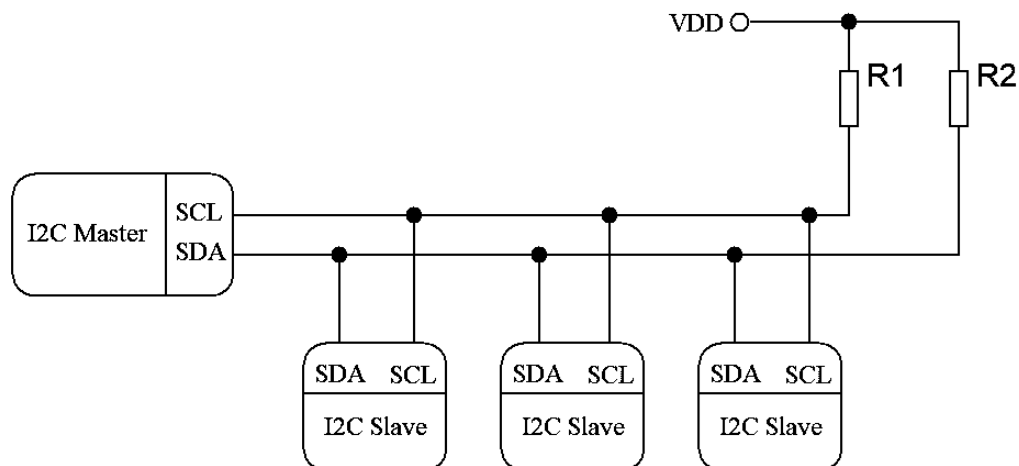
2.3.1.1 Výhody a nevýhody sběrnice SPI

Největší výhodou sběrnice SPI je jednoduchost a tím i snadná implementace. Jednoduchý je jak přenosový protokol, tak i elektrické rozhraní sběrnice. Další výhodou je vysoká přenosová rychlost, která má bitovou rychlost 1 až 10 Mbit/s.

Mezi nevýhody patří převážně existence pouze jednoho zařízení, které může pracovat v režimu Master. Další nevýhodou je krátká přenosová vzdálenost, která je dána nutností synchronizace hodinového signálu s přenášenými daty. Nevýhodou je i to, že existuje několik způsobů synchronizace dat hodinový signálem. [12]

2.3.2 I2C

Dalším zástupcem sériové sběrnice je protokol I2C (Internal-Integrated-Circuit Bus). Zařízení na této sběrnici také fungují v režimu Master/Slave. Ke komunikaci jsou použité pouze dva signálové vodiče. K přenosu dat dochází na vodiči označovaném SDA (Serial Data). Data jsou vyhodnocované při náběžné hraně hodinového signálu SCL (Serial Clock). Úroveň na datovém vodiči se smí měnit pouze při nízké úrovni signálu SCL, až na speciální komunikaci při startu a ukončení přenosu. Master vybírá zařízení Slave pomocí 7-bitové adresy, kterou vysílá jako první část zprávy po zahájení komunikace. Na Obr. 2.24 je blokové schéma I2C sběrnice. [14]



Obr. 2.24 Blokové schéma I2C sběrnice [14]

2.3.2.1 Výhody a nevýhody sběrnice I2C

Hlavní výhodou I2C sběrnice je malý počet vodičů. Některé zařízení je dokonce možné napájet přímo z datového vodiče s využitím vnitřního kapacitoru. Díky detekci kolize na sběrnici je také možné připojit více zařízení typu Master.

Mezi nevýhody patří větší režie komunikace způsobená adresováním zařízení. Sběrnice I2C je typu half-duplex, tzn. nelze zároveň vysílat a přijímat data. [14]

2.4 Ovládání měřicích přístrojů pomocí rozhraní VISA

Rozhraní VISA (Virtual Instrument Software Architecture) je široce používaný standard komunikace s měřicími přístroji, který je podporován naprostou většinou výrobců. Toto rozhraní je možné provozovat pomocí různých sběrnic.

2.4.1 GPIB sběrnice

GPIB je sběrnice pro testování procesů a automatizačních měření. Tato soustava byla určena pro sestavování flexibilních měřicích systémů, a to i pro komunikaci na větší vzdálenosti, může tak pracovat v rozsahu jedné nebo hned několika testovacích laboratoří. Systém tvoří přístroje, které mohou být navzájem spojeny paralelní sběrníci liniového typu s počítačem. Tento systém má velikou výhodu od ostatních sběrnic a to takovou, že je vybaven vstupními obvody pro potlačení rušení. Na sběrnici je možné paralelně připojovat až 31 přístrojů. Každý přístroj musí mít unikátní adresu, aby nedocházelo ke kolizím na sběrnici. [17]

2.4.2 Přenos po síti s využitím TCP/IP

Nové přístroje už podporují i komunikaci VISA přes TCP/IP. Můžeme je tedy ovládat na velké vzdálenosti pomocí firemní LAN (Local Area Network) sítě. Přístroje nemusí být přímo spojeny s ovládacím počítačem. Tato metoda také umožňuje vyšší přenosovou rychlost až v řádech Gbit/s.

2.4.3 Sběrnice USB

Přístroje je také možné připojit k měřicímu počítači pomocí USB (Universal Serial Bus) sběrnice. Pomocí běžného USB kabelu připojíme jeden přístroj. Počet připojených přístrojů je omezen pouze normou pro USB.

2.5 Sériová výroba

Sériová výroba je výroba určitého množství stejných produktů s použitím dílů a součástek. V této výrobě se využívají moderní technologie, roboty, montážní linky a automaty. Je zapotřebí přesného řízení a plánování výroby. V dnešní době se k řízení využívají počítače a specializovaný software.

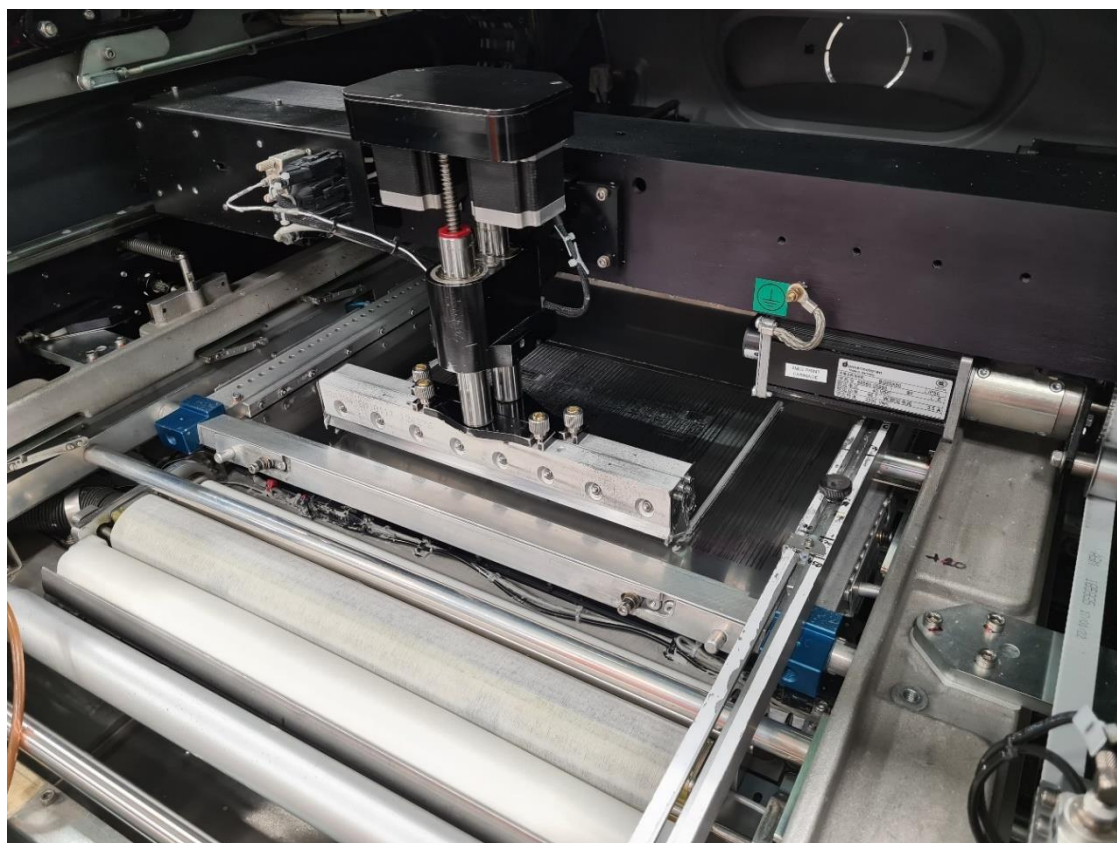
Při výrobě DPS se nejprve ověří dostupnost materiálu (součástek a tištěných spojů). Součástky se připraví do zásobníku pro automatické osazení. Zásobníky se připojí na automatické osazovačky, které zajišťují osazování DPS součástkami s velikou přesností a rychlostí. Aby se součástka zapájela, je použita pájecí pasta. Ta je nanášena pomocí technologie sítotisku (šablonový tisk). Sítotisk obsahuje šablonu, kterou se protlačí pájecí pasta na DPS. Pasta se nanáší po celé ploše a protlačí se stěrkou. DPS se po osazení přesouvá do pece, kde dojde k připájení součástek na plošky. Tato DPS následně vychladne a přesune se na optickou kontrolu, kde výstupem jsou zobrazené chyby pájení. Tyto chyby jsou následně zkontrolovány pracovníkem příslušného sektoru. Chyby jsou opraveny ručním pájením.

2.5.1 Sklad materiálu

Skldem materiálu se rozumí prostory, kde se skladují materiály pro výrobu. Přehled o počtu kusů a další podrobné informace jsou zaznamenány do elektronického inventáře. V tomto inventáři se lze jednoduše orientovat a dále mít přehled o možnostech výroby. Před započítáním výroby se provede kontrola materiálu potřebného pro výrobu DPS.

2.5.2 Sítotisk

Sítotisk slouží ve výrobě elektroniky k nanášení pájecí pasty na DPS. Šablona tvoří při sítotisku tzv. masku. Nanášení je prováděno tiskem přes síto (šablonu) vyrobenou z tenkého plechu, které je napnuté na pevném rámu. Tento rám je uchycen do tiskového stroje. Přes šablonu se táhne po celé ploše stěrka, která přenesse pájecí pastu skrze šablonu na DPS. Na Obr. 2.25 je sítotisk z výrobní linky.



Obr. 2.25 Sítotisk

2.5.3 Automatické osazování součástek

Při automatickém osazování musí SMD (Surface Mount Device) součástka s dostatečnou přesností dosednout na pájecí plošky. Plošky mají na sobě nanesenou pájecí pastu. Součástky díky viskózním vlastnostem pasty, do které je osazovací automat umístil, drží na místě a při další manipulaci tak snadno nepadnou. Automatické osazování součástek může probíhat sekvenčně nebo simultánně.

Při sekvenčním osazování jsou součástky vyjímány postupně ze zásobníku a usazovány na DPS. Rychlost umístění je 1000 až 4000 součástek za hodinu. Řízení automatu se provádí počítačem, ve kterém jsou naprogramované souřadnice jednotlivých součástek. Při změně osazované DPS stačí změnit náplně zásobníku součástek a program.

Při simultánním osazování je usazováno současně několik součástek. Velké osazovací automaty mohou osazovat 30 až 300 součástek současně. Uvádí se 30 000 až 300 000 osazených součástek za hodinu. Na Obr. 2.26 je automatická osazovačka z výrobní linky.



Obr. 2.26 Automatická osazovačka

2.5.4 Pájení SMD součástek

SMD součástky jsou při pájení vystaveny vysokým teplotám. Roztavením pájecí pasty se spojí součástky s ploškami. Teplotní profil pájení je daný vlastnostmi jednotlivých součástek a materiálů použitých na DPS. Na Obr. 2.27 je průběžná přetavovací pec z výrobní linky.



Obr. 2.27 Průběžná přetavovací pec

2.5.5 Optická kontrola

DPS jsou kontrolovány pomocí automatické optické inspekce (Automated Optical Inspection, AOI) s použitím vyhodnocovacího softwaru. Při nasvícení silným světlem různých barev a pod různými úhly se pomocí kamery vizuálně kontrolují přítomnost, orientaci a polaritu součástí, kvalitu pájeného spoje, zkratky sousedních ploch atd. Po skončení kontroly jsou součástky a spoje, které nevyhověli při automatickém hodnocení zobrazeny obsluze a ta rozhodne, zda se jedná o falešně negativní výsledek nebo je potřeba provést opravu. Na Obr. 2.28 je optická kontrola z výrobní linky.



Obr. 2.28 Optická kontrola

2.5.6 Funkční testy

Osazené DPS se testují a provádí se u nich kontrola parametrů. Všechny parametry se zapisují do protokolu. Testovací zařízení umožňuje testovat DPS automaticky. Díky automatickému vyhodnocení změřených hodnot lze kontrolovat kvalitu výroby DPS a eliminovat chyby při dalším použití testovaných DPS.

2.6 Měřicí pracoviště

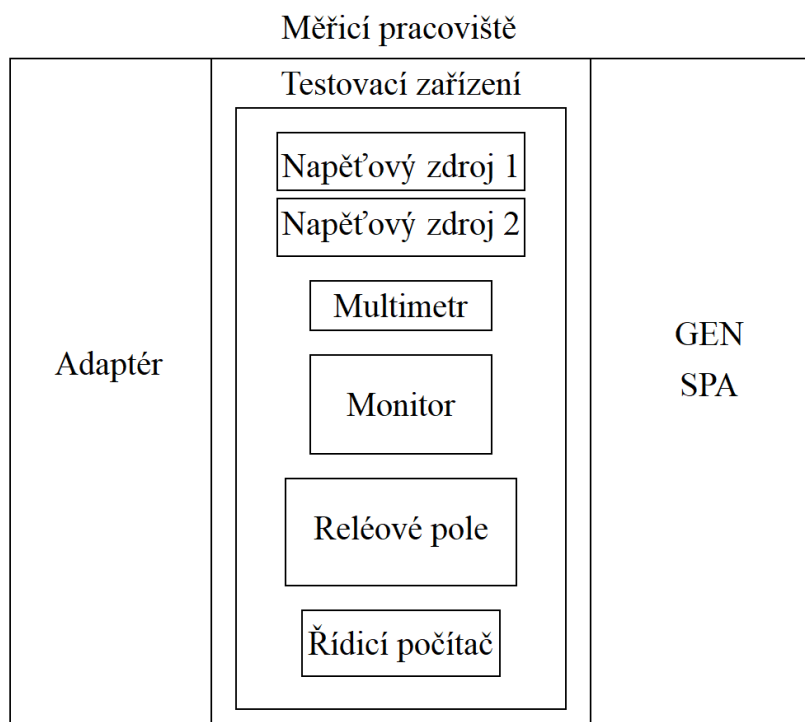
Měřicí pracoviště obsahuje zařízení pro elektrické a elektronické výrobky, které slouží primárně pro nastavení a kontrolu elektrických nebo mechanických parametrů v sériové výrobě (Kap. 2.6.1). Měřicí pracoviště obsahuje vybavení a adaptéry, které umožňují kompletní testy výrobků v oblasti automobilového průmyslu, telekomunikací, průmyslové elektroniky, dopravy, domácích spotřebičů, audio systémů a měřicích přístrojů. Na Obr. 2.29 je příklad měřicího pracoviště.



Obr. 2.29 Měřicí pracoviště

2.6.1 Blokové schéma

Na Obr. 2.30 je blokové schéma měřicího pracoviště. Měřicí pracoviště obsahuje dva napěťové zdroje, jeden multimetr, monitor, reléové pole a řídicí počítač. Dále adaptér pro připojení testovaného zařízení (Device Under Test, DUT) a další přidané přístroje.



Obr. 2.30 Blokové schéma měřicího pracoviště

2.6.2 Reléové pole

Reléové pole umožňuje připojení adaptéru k měřicímu pracovišti a k přístrojům. Umožňuje též generování digitálních signálů.

2.6.2.1 Bitová měřicí karta

Bitová měřicí karta slouží ke čtení a generování signálu ve zvolené napěťové hladině. Lze nastavovat i jednotlivé bity samostatně. Můžeme jí využít například k emulaci SPI sběrnice.

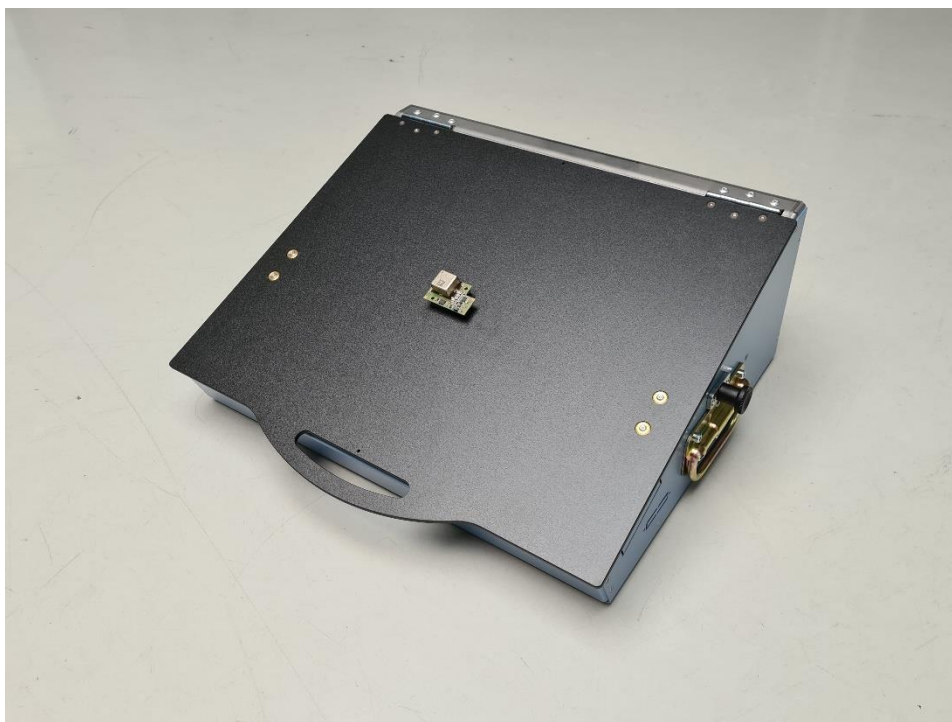
2.6.2.2 Reléová karta

Reléová karta umožňuje spojení vstupů jednotlivých měřicích přístrojů s výstupy DUT. Existují různé druhy relé, například DC (Direct Current, stejnosměrné napětí), HF (High Frequency, vysokofrekvenční) a LF (Low Frequency, nízkofrekvenční). Rozmístění reléového pole je pevně definováno, což zjednodušuje návrh měřicího adaptéru.

2.6.3 Měřicí adaptér

Měřicí adaptér je sestava připojena k reléovému poli a slouží k propojení signálů z měřicího pracoviště a přístrojů k DUT. Tento způsob zapojení umožňuje používat univerzální měřicí zařízení pro různé druhy DUT pouhou výměnou měřicího adaptéru. Na Obr. 2.31 je příklad adaptéru.

Každý měřicí adaptér musí mít dokumentaci, tzv. analýzu rizik. Tato analýza zahrnuje veškeré informace a varování pro obsluhu. Pro sepsání této dokumentace je zapotřebí definovat veškeré možná bezpečnostní rizika jako je např. vysoké napětí, elektromagnetické rušení, hmotnost adaptéru a další.



Obr. 2.31 Měřicí adaptér pro propojení DUT s testovacím zařízením

2.6.4 Testovací program

Testovací program je software umožňující vytváření testů a jejich řazení do sekvencí pro optimální způsob testování DUT. Výsledky jednotlivých testů jsou automaticky vyhodnocovány a protokolovány. Před každým měřením je nutné zkontrolovat kalibraci přístrojů a naměřit korekční data. Korekční data slouží k anulování nepřesnosti měření.

3 Praktická realizace

Cílem je sestavit měřicí systém pro obvody OCXO. Nejprve se musí prostudovat problematika měření. Po výběru vhodných měřicích přístrojů se navrhne zapojení měřicího adaptéru. Dále se připraví model měřicího adaptéru, aby se mohli rozvrhnout veškeré komponenty. Komponenty, ze kterých se měřicí adaptér skládá se nechají vyrobit na specializovaném pracovišti a následně se v měřicí laboratoři sestaví měřicí adaptér.

Po sestavení měřicího adaptéru se provede veškeré elektrické zapojení, které bylo připraveno. Poté se připojí měřicí adaptér na testovací zařízení. Při prvním spuštění se ověří správnost zapojení napájecích vodičů. Následně se vytvoří program v programovacím jazyce C. Nakonec se měřicí systém testuje a ladí, dokud všechny parametry neodpovídají měřicímu předpisu.

Výstupem prováděných měření je protokol, který uvádí veškeré naměřené hodnoty, předepsané limity a vyhodnocení testů DUT.

3.1 Měřicí předpis

Měřicí předpis je dokumentace, která popisuje funkce DUT a způsob kontroly jednotlivých parametrů. V této dokumentaci lze zjistit jaké přístroje jsou zapotřebí a jaké parametry by se měli změřit. Podle dokumentace se vytvoří měřicí program, který bude zahrnovat jednotlivá měření. Pro naměřené hodnoty jsou definovány limity pro vyhodnocení výsledku. Výsledek může být stanoven jako vyhovující při splnění limitů nebo nevyhovujícího při jejich překročení.

3.2 Zadání měření

- 1) Měření odebíraného proudu při napájecím napětí 11 V

Tab. 3.1 Limity pro měření odebíraného proudu

Napětí [V]	FLL [mA]	FUL [mA]	Přístroje
+11	100	400	Zdroj napětí

- 2) Měření odchylky od nominální frekvence signálu generovaného obvodem OCXO při variabilním napájecím napětím
 - Měří se odchylka od nominální frekvence pro různá napájecí napětí a úroveň výstupního signálu při softwarovém vypnutí napájení OCXO oscilátoru.

Tab. 3.2 Limity pro odchylky od nominální frekvence OCXO

Napětí [V]	Nominální frekvence [MHz]	Odchylka [Hz]	Přístroje
+9,5	10	±10	Zdroj napětí a SPA
+12,2	10	±10	Zdroj napětí a SPA

- Po změření frekvence se vypne napájení OCXO, počká se 1 sekundu a provede se měření výstupní úrovně, pak se opětovně zapne napájení OCXO.

Tab. 3.3 Limit po vypnutí OCXO na 1 sekundu

OCXO OFF	FUL [dBm]	Přístroje
1 sekunda	< -60	Zdroj napětí a SPA

- Změna frekvence při jednom kroku potenciometru

Tab. 3.4 Limit frekvence jednoho korku potenciometru

Potenciometr	FLL [Hz]	FUL [Hz]	Přístroje
Krok	0,010	0,100	Zdroj napětí a SPA

- Nastavení pracovní frekvence OCXO

- Postupně se přidávají kroky na digitálním potenciometru, dokud nebude na OCXO naladěná přesná frekvence

Tab. 3.5 Limit pracovní frekvence

Nominální frekvence [MHz]	Odchylka [Hz]	Přístroje
10	±0,1	Zdroj napětí a SPA

- Když je naladěná přesná frekvence signálu, vyčte se z digitálního potenciometru nastavená hodnota

Tab. 3.6 Limity pro kroky pro přesné naladění frekvence

Potenciometr	FLL [poloha]	FUL [poloha]	Přístroje
512	400	650	Zdroj napětí a SPA

- Měření výstupní úrovně OCXO při 10 MHz

Tab. 3.7 Limity pro výstupní úroveň

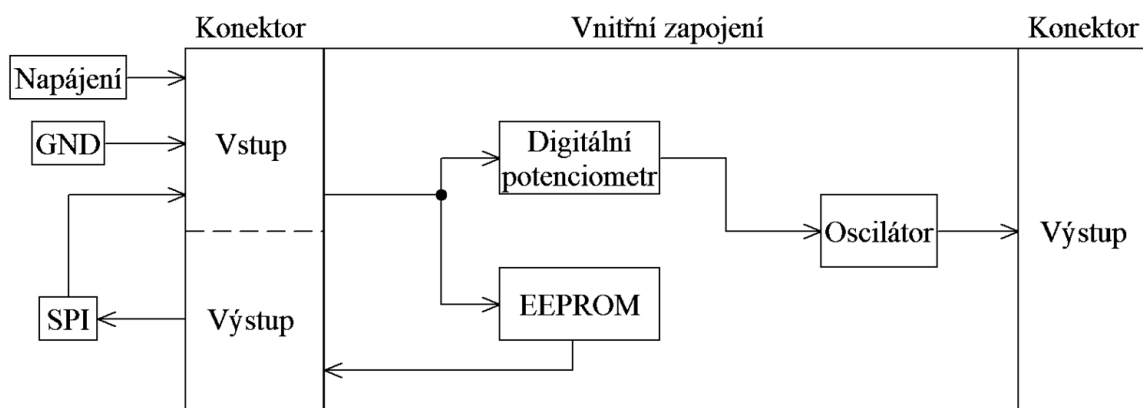
Frekvence [MHz]	FLL [dBm]	FUL [dBm]	Přístroje
10	4	10	Zdroj napětí a SPA

- Zápis dat do EEPROM

- Uloží se do EEPROM nastavená hodnota potenciometru

3.3 Deska plošných spojů oscilátoru OCXO blokové schéma (DUT)

Na Obr. 3.1 je vyobrazeno blokové schéma DUT. Skládá se ze vstupní svorky, kam se přivádí napájecí napětí a SPI sběrnice. Dalšími bloky jsou digitální potenciometr, EEPROM paměť a oscilátor OCXO.



Obr. 3.1 Blokové schéma DPS

3.4 Zapojení měřicího adaptéru

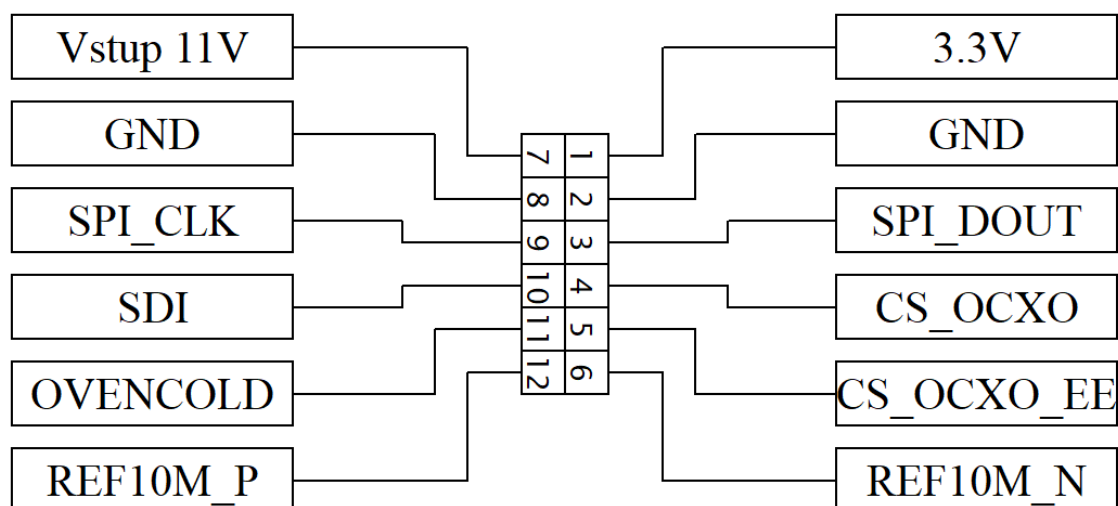
Měřicí adaptér umožňuje připojení DUT k měřicímu zařízení. Díky tomu je možné používat univerzální měřicí pracoviště pro různé DUT pouhou výměnou měřicího adaptéru. Na Obr. 2.31 je ukázka měřicího adaptéru.

Nejprve se prostuduje měřicí předpis, kde jsou definované jednotlivé parametry a funkce měřeného DUT. V Kap. 3.2 jsou požadavky měření z daného předpisu. Následně se nakreslí v aplikaci speciálně vyvinuté pro vnitřní potřebu Rohde&Schwarz zapojení celého adaptéru. Tímto programem se navrhne veškeré drátované zapojení v měřicím adaptéru.

Nejprve se připojí zdroj napětí, který vede na reléové pole, aby se mohlo v určitý okamžik připojit nebo odpojit napájení. Tento zdroj umí i měřit odebíraný proud. Proto není zapotřebí ampérmetru a hodnotu odebíraného proudu lze vyčítat z napájecího zdroje. Dále se zapojí signály pro sériovou komunikaci k bitové měřicí kartě, která dokáže emulovat SPI komunikaci. Výstupní signály z OCXO se připojí na symetrizací člen (balun), na kterém transformátor vytvoří ze symetrického signálu o impedanci $100\ \Omega$ nesymetrický signál o impedanci $50\ \Omega$ vhodný pro připojení ke spektrálnímu analyzátoru (Spectrum Analyzer, SPA). Výstup sumarizačního členu se poté zapojí ke speciálnímu vstupu reléové karty pro vysoké frekvence (High Frequency, HF), který slouží jako propojení k SPA.

3.5 Zapojení konektoru v měřicím adaptéru pro testování OCXO

Na Obr. 3.2 je zapojení konektoru v měřicím adaptéru pro testování desky OCXO. Do tohoto konektoru se připojují testované DPS, aby došlo k propojení s měřicím zařízením. Přesněji je propojen s reléovým polem a s měřicími kartami. Popis jednotlivých značení je popsán v Tab. 3.8.



Obr. 3.2 Blokové schéma zapojení konektoru

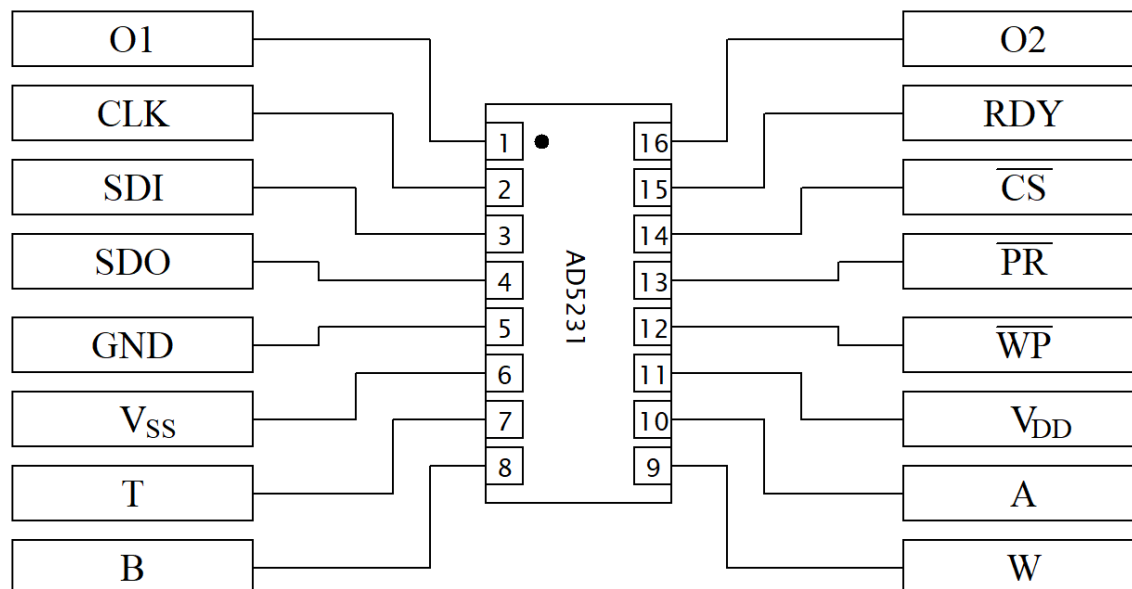
Tab. 3.8 Popis vstupů a výstupů na konektoru

Název	Funkce
Vstup 11 V	Napájení 11 V pro OCXO
GND	Uzemnění
CLK	Hodiny pro SPI
SDI	SPI vstup
OVENCOLD	Nastavování teploty
REF10M_P	Pozitivní výstup OCXO
3,3V	Napájení 3,3V (potenciometr, EEPROM)
SPI_DOUT	SPI výstup
CS_OCXO	Chip Select OCXO
CS_OCXO_EE	Chip Select OCXO EEPROM
REF10M_N	Negativní výstup OCXO

Digitální potenciometr OCXO

Digitální potenciometr, který je použitý na DPS pro OCXO, má DAC s rozlišením 10 – bitů (2^{10} kroků = 1024 kroků). Jedná se o integrovaný obvod, který má nastavitelný odpor v rozmezí od 0 do 10, 50 nebo 100 k Ω podle použitého typu. Obvod se pomocí SPI sběrnice a slouží k nastavení frekvence oscilátoru OCXO.

Aplikace tohoto integrovaného obvodu je rozmanitá. Na Obr. 3.3 je elektronický digitální potenciometr a jeho blokové schéma vstupů a výstupů. Vysvětlení jednotlivých vstupů a výstupů najdeme v Tab. 3.9.



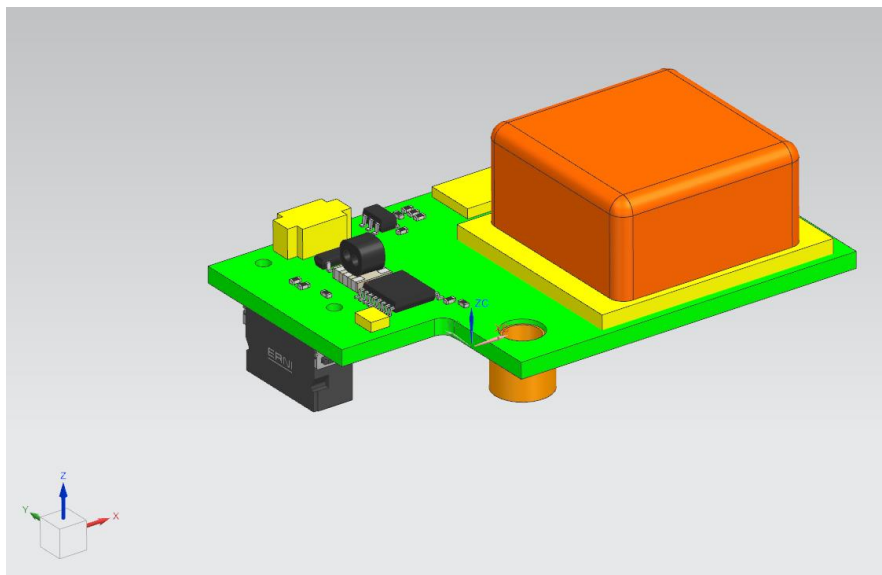
Obr. 3.3 Potenciometr (vstupy a výstupy)

Tab. 3.9 Popis vstupů a výstupu na potenciometru

Název	Popis funkce
O1	Digitální výstup 1
CLK	Hodiny
SDI	Sériový vstup (data)
SDO	Sériový výstup (data)
GND	Uzemnění
V _{SS}	Negativní zdroj
T	Tovární nastavení
B	Terminál B – RDAC
W	Nastavovací Terminál – RDAC
A	Terminál A – RDAC
V _{DD}	Kladný zdroj
WP	Volitelný pin na ochranu proti zápisu
PR	Volitelný přednastavený pin pro HW potlačení
CS	Chip Select
RDY	Připraveno
O2	Digitální výstup 2

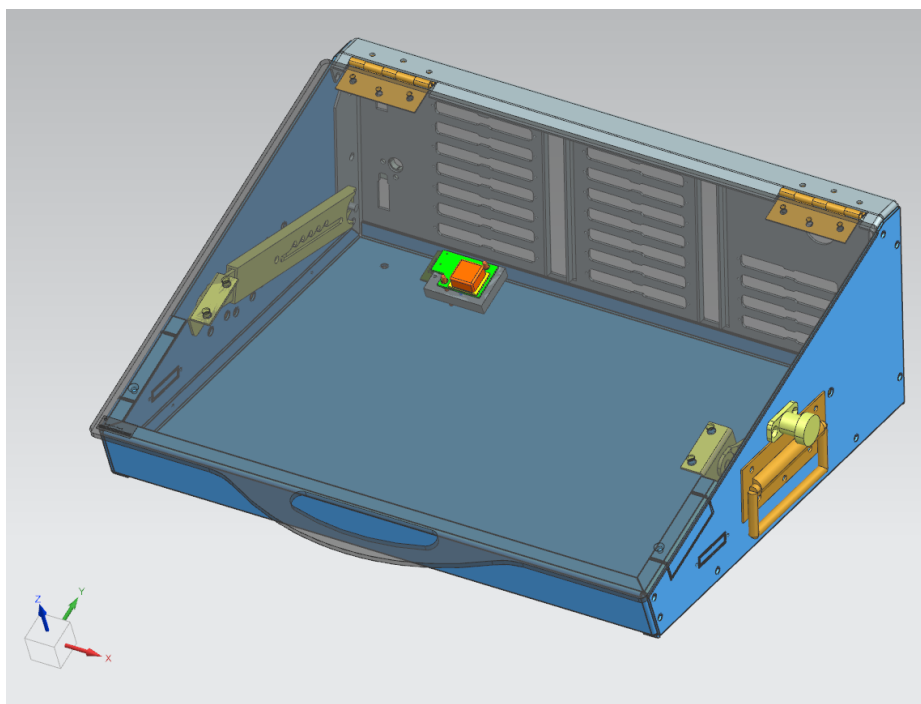
3.6 Modelování a konstrukce měřicího adaptéru

Po navržení elektrického zapojení a veškerých komponent, se může navrhnout model měřicího adaptéru. Následně se vyrobí komponenty a smontuje se měřicí adaptér. Modelování komponentů se provede v programu Siemens NX. Model DUT je k dispozici v knihovnách Rohde&Schwarz. Na Obr. 3.4 je zobrazen model DUT OCXO.



Obr. 3.4 Model DUT OCXO

Základní konstrukce je standardizována, což zrychluje návrh měřicího adaptéru. Při modelování se upravuje uchycení DUT k měřicímu adaptéru a k vnitřnímu elektrickému zapojení. Na následujícím Obr. 3.5 je kompletní model měřicího adaptéru.

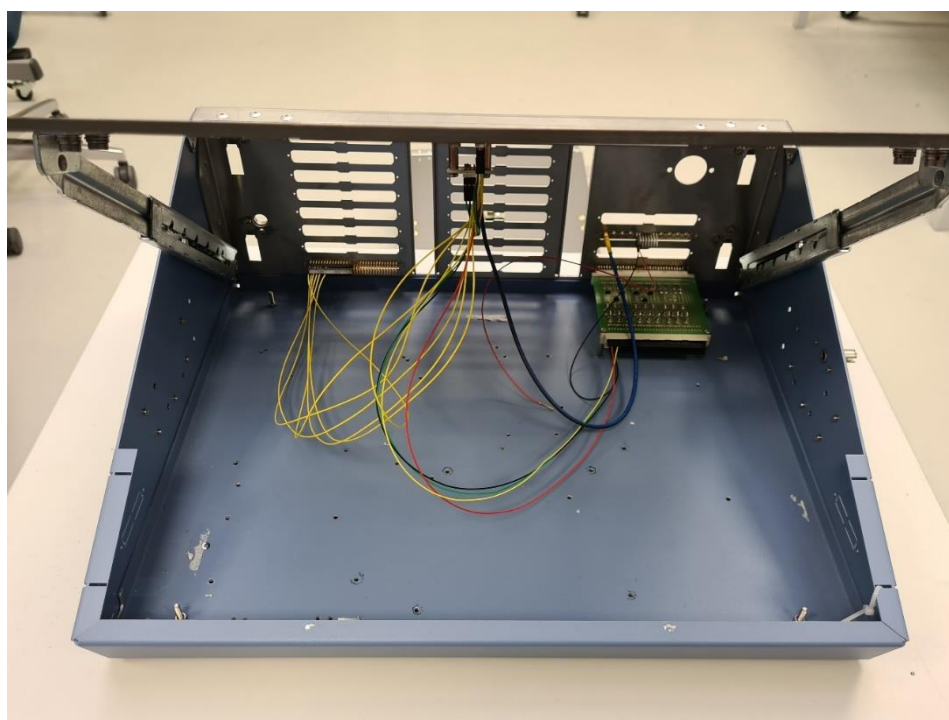


Obr. 3.5 Kompletní model měřicího adaptéru s DUT

Jednotlivé komponenty se vyrábí ve výrobním závodě společnosti Rohde&Schwarz. V laboratoři jsou dostupné spojovací materiál a nástroje potřebné k sestavení měřicího adaptéru. Dále se musí stanovit analýza rizik. Tato analýza vyhodnocuje bezpečnost zařízení vůči obsluze a okolí. Musí se dbát na bezpečnost obsluhy jako je např. nebezpečné napětí (může dojít ke kontaktu s částí pod napětím), těžký měřicí adaptér (může dojít k poranění zad), ventilátory (může dojít k poranění prstu) a další. U přístrojů s HF vyzařováním je třeba dbát na možné riziko ozáření gonád nebo plodu. Dále se musí zohledňovat bezpečnost vůči okolí, tzn. měřicí adaptér nesmí vyzařovat elektromagnetické záření, které by mohlo poškodit jiné zařízení nebo ovlivnit jeho funkci tzn. možné riziko pro osoby s kardiostimulátorem.

3.7 Elektrické zapojení měřicího adaptéru

Po sestavení měřicího adaptéru dojde k elektrickému zapojení. Použijí se vodiče AWG24 s dostatečnou proudovou zatížitelností. Tento vodič se naměří a zastříhne na požadované délce. Takto se připraví potřebný počet vodičů a následně se odizolují konce. Poté dojde pomocí lisovacích kleští k nalisování dutinových kontaktů, které jsou vyrobeny z fosforového bronzu s pozlacením. Kontakty se zasunou do konektorové zásuvky, kde se kontakt pomocí zpětné pojistky upevní. Konektor se připojí na pinovou lištu, která vede do reléového pole. Takto se zapojí veškeré elektrické spojení dle návrhu. Na Obr. 3.6 je možné vidět zkompletovaný a zadrátovaný měřicí adaptér, který je možné použít k měření OCXO.



Obr. 3.6 Elektrické zapojení měřicího adaptéru

3.8 Testovací program

Testovací program řídí proces testování a ovládá měřicí přístroje připojené k testovacímu zařízení. Dále slouží pro kontrolu parametrů DUT. Měřicí postup odpovídá měřicímu předpisu. Na základě měřicího předpisu se vytváří jednotlivé měřicí testy, které vyhodnocují a protokolují parametry DUT.

Program se píše v programovací jazyce C. Programovací prostředí je Visual Studio 2022. Program zahrnuje systematické uspořádání jednotlivých testů, které testují DUT a zapisují výsledky do protokolu.

Vzhledem k citlivé povaze informací je nutné respektovat smluvní mlčenlivost Rohde&Schwarz, není možné zveřejnit žádné podrobnosti o tom, jak kód vypadá. Do této práce bylo povoleno blokové schéma, kterým lze popsat postup a funkci měření (Kap.3.9).

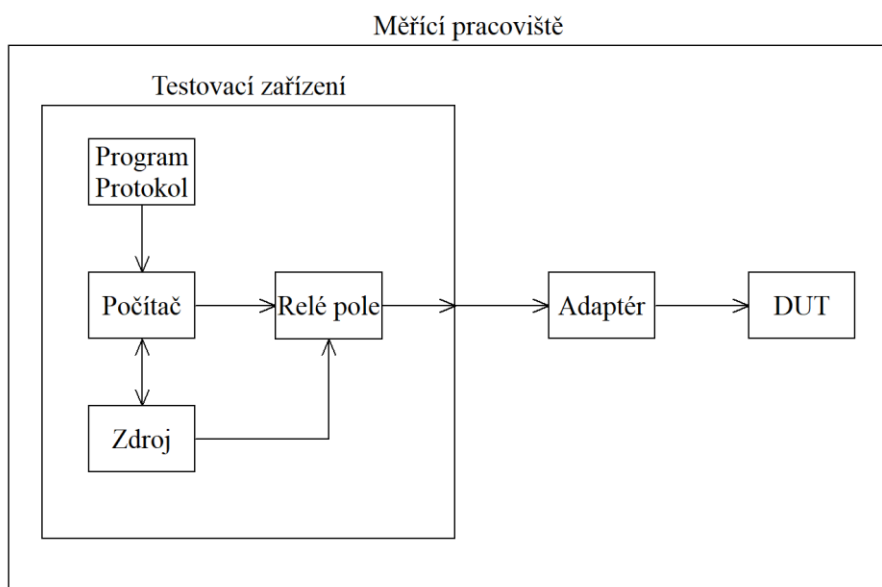
3.9 Měření OCXO

Hotový měřicí adaptér se připojí na testovací zařízení a následně se připojí jednotlivé DUT, aby se mohl měřit OCXO oscilátor. Měření probíhá v systematickém uspořádání, vyhodnocují se naměřené hodnoty a výsledky se zapisují.

3.9.1 Měření odebíraného proudu při napájecím napětí 11 V (měření 1)

Na vstup OCXO se přivede pomocí napájecího zdroje napětí 11 V a nastaví se omezení proudu na 500 mA. Měří se odebíraný proud ze zdroje a vyhodnocuje se jeho velikost na základě limitů z měřicího předpisu.

Blokové schéma



Obr. 3.7 Zapojení měřicího pracoviště (měření 1)

Vývojový diagram

Na Obr. 3.8 je vývojový diagram pro měření odebíraného proudu při napájecím napětí 11 V. Řídicí počítač nastaví požadované napětí a omezení proudu. Pak připravené napětí připojí na DUT přes reléové pole a změří se odebíraný proud. Dále se provede zápis do protokolu a zde se vyhodnotí, zdali je naměřená hodnota v rámci tolerancí daných měřicím předpisem.



Obr. 3.8 Vývojový diagram (měření 1)

Výpis do protokolu

Na Obr. 3.9 je změřený test pro měření 1. Hodnota odebíraného proudu vyšla 289 mA.

1 Current consumption					
Voltage[V]	Power supply	Test point	FLL/mA	FUL/mA	Act./mA
+11V	PS1 CH1	xxx	100	400	289

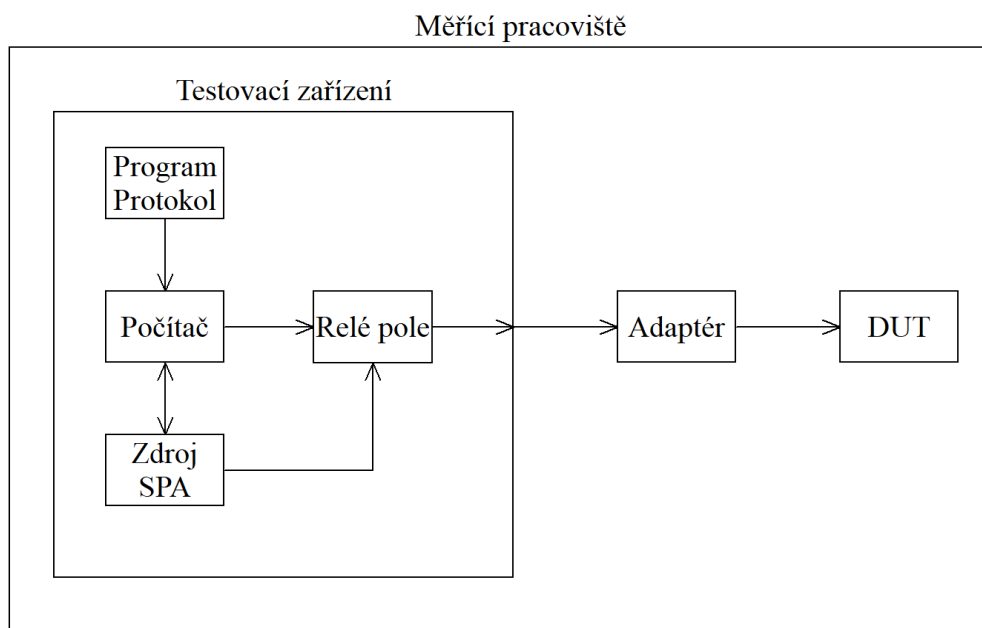
Obr. 3.9 Výpis do protokolu (měření 1)

3.9.2 Měření odchylky od nominální frekvence OCXO při variabilním napájecím napětím (měření 2)

V tomto měření je potřeba ověřit funkčnost OCXO při různých úrovních napájecího napětí. Dále se ověřuje možnost vypnutí výstupního signálu.

Nastaví se napájecí zdroj na 9,5 V a proudový limit na 500 mA. Spektrální analyzátor se nastaví na střední frekvenci (Center Frequency) 10 MHz, šířku pásma (Span) 1 MHz a referenční úroveň 10 dBm. Zapne se odměr hodnoty pomocí funkce Marker Peak a odečte se přesná frekvence. Následně se vypne výstupní signál DUT (softwarové vypnutí) a změří se úroveň výstupního signálu. Stejně měření se provede pro napájecí napětí 12,2 V.

Blokové schéma



Obr. 3.10 Zapojení měřicího pracoviště (měření 2, 3, 4, 5)

Vývojový diagram

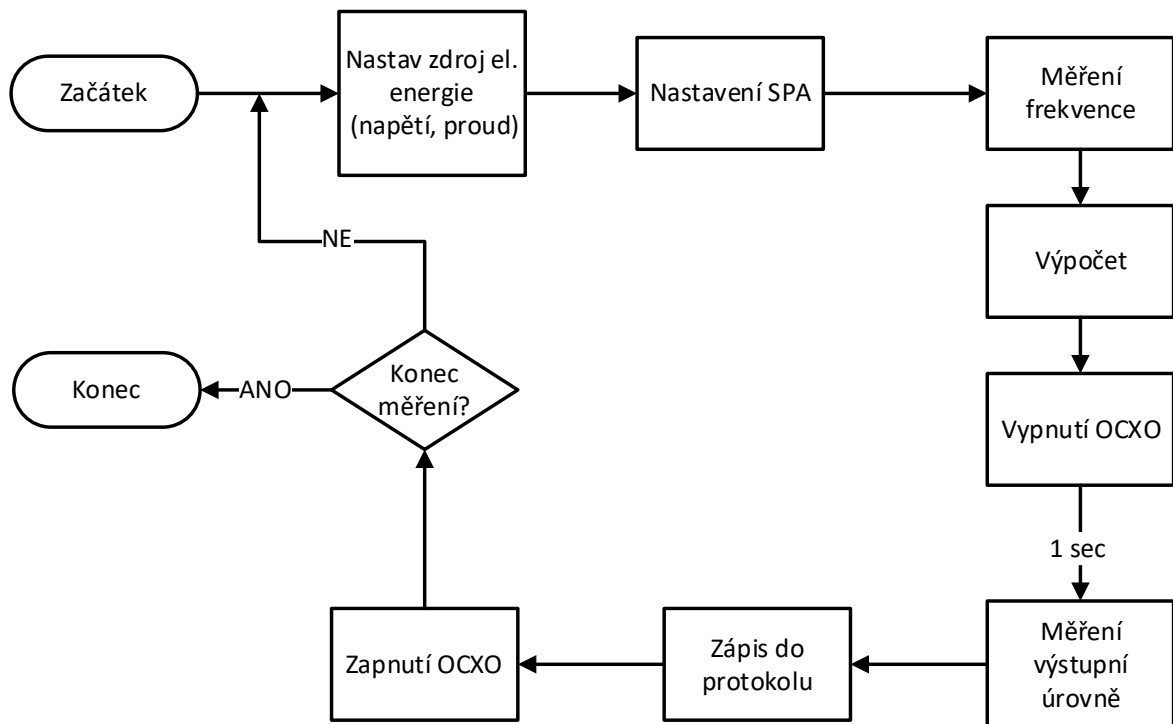
Na Obr. 3.11 je vývojový diagram pro měření 2. Řídicí počítač nastaví na zdroji napětí a omezení proudu. Dále se nastaví SPA. Následuje měření frekvence signálu, ze které se vypočte aktuální odchylka (Actual) od nominální frekvence oscilátoru. Výpočet je dán vztahem (4):

$$Actual = f_{nom} - f_m, \quad (4)$$

kde f_{nom} je nominální frekvence oscilátoru, f_m je naměřená hodnota ze SPA.

Poté se vypne OCXO, počká se 1 sekundu a změří se výstupní úroveň. Naměřené a vypočítané hodnoty se zapíší do protokolu.

Zapne se OCXO a měření se provádí pro další úroveň napájecího napětí dle měřicího předpisu. Měřicí program vyhodnotí změřené hodnoty podle limitů z měřicího předpisu.



Obr. 3.11 Vývojový diagram (měření 2)

Výpis do protokolu

Na Obr. 3.12 je změřený test pro měření 2. Při 9,5 V byla naměřena odchylka nominální frekvence OCXO -0,03 Hz a při 12,2V činila hodnota také -0,03 Hz. Úroveň výstupního signálu při vypnutí na 1 sekundu. Vypnutí OCXO na 1 sekundu bylo ve všech případech pod -60 dBm. Výpočet Actual je dán vztahem (4).

2 Operation with different supply voltages

Freq.Counter	Voltage path	Voltage set/V	Output nom./Hz	FLL	FUL	Actual
SPA1	+11V	9.5	10.0e6	-10.0 Hz	+10.0 Hz	-0.03 Hz
OCXO level after 1 se. software turn off						-82.9 dBm
SPA1	+11V	12.2	10.0e6	-10.0 Hz	+10.0 Hz	-0.03 Hz
OCXO level after 1 se. software turn off						-85.2 dBm

Obr. 3.12 Výpis do protokolu (měření 2)

3.9.3 Umělé stárnutí

Po ověření základní funkčnosti DUT se provede prvotní stárnutí. Délka je daná měřicím předpisem. Může trvat několik hodin až dnů. DUT je během měření trvale připojen ke zdroji napájecího napětí. Žádné parametry nejsou kontrolovány. Stárnutí je provedeno na jiném adaptéru, který není součástí této diplomové práce. Po uběhnutí předepsané doby stárnutí se pokračuje dalšími měřeními.

3.9.4 Změna frekvence při jednom kroku potenciometru (měření 3)

V tomto kroku měření se vypočítá, o kolik se změní frekvence oscilátoru při změně hodnoty na potenciometru o jeden krok. Nastaví se napájecí zdroj na 11 V a omezení proudu na 500 mA. Dále se připojí spektrální analyzátor pro měření frekvence.

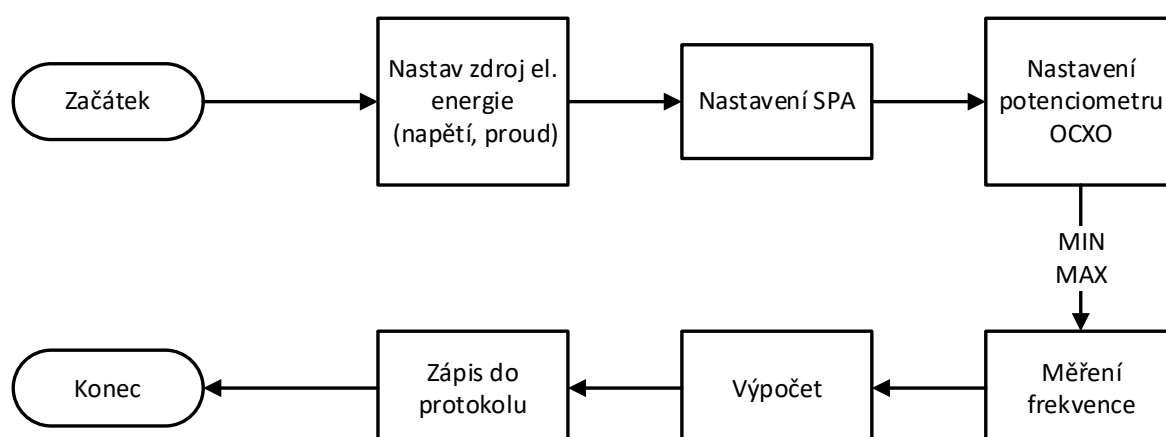
Před měřením se resetuje nastavení spektrálního analyzátoru a nastaví se na střední frekvenci (Center Frequency) 10 MHz, šířku pásma (Span) 1 MHz a referenční úroveň 10 dBm. V posledním kroku se aktivuje funkce přesného měření frekvence pomocí čítače (Counter Marker).

Blokové schéma

Schéma je ve stejné konfiguraci jako v předchozí kapitole (Obr. 3.10).

Vývojový diagram

Na Obr. 3.13 je vývojový diagram pro měření 3. Řídicí počítač nastaví na zdroji napětí a omezení proudu. Dále nastaví spektrální analyzátor. V dalším kroku se nastaví potenciometr na minimální hodnotu. Změří se minimální frekvence oscilátoru OCXO. Následuje přenastavení potenciometru na maximální hodnotu a změří se maximální frekvence. V programu se rozdíl naměřených hodnot vydělí maximálním počtem kroků digitálního potenciometru. Výsledkem je změna frekvence, která nastane při přenastavení digitálního potenciometru o jeden krok. Vypočtená hodnota se vyhodnotí, zdali je v rámci tolerancí daných měřicím předpisem.



Obr. 3.13 Vývojový diagram (měření 3)

Výpis do protokolu

Na Obr. 3.14 je výsledek pro měření 3. Změna kroku potenciometru ovlivnila frekvenci oscilátoru o 0,021 Hz.

3.1 Tune range

	FLL / Hz	FUL / Hz	Actual / Hz
Delta frequency / Poti Step	0.010	0.100	0.021

Obr. 3.14 Výpis do protokolu (měření 3)

3.9.5 Nastavení pracovní frekvence OCXO (měření 4)

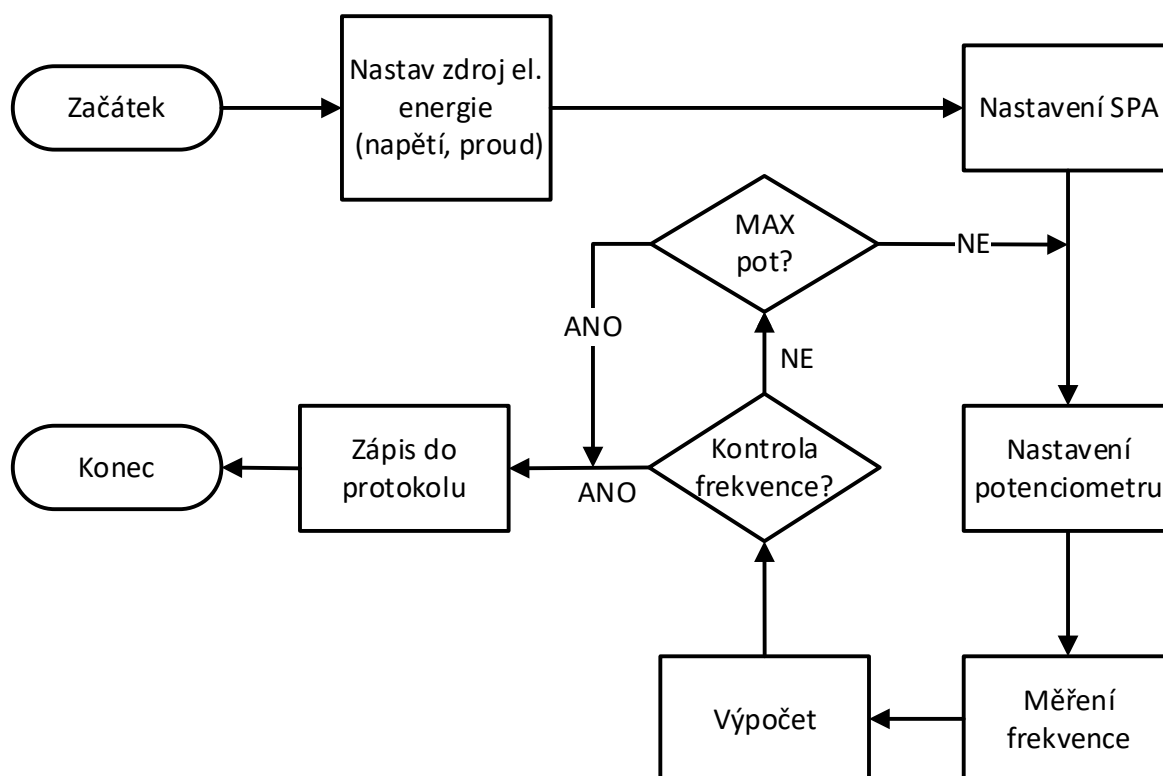
V tomto měření je potřeba nastavit pracovní frekvenci. Nastaví se napájecí zdroj na 11 V a omezení proudu na 500 mA. Před měřením se resetuje nastavení spektrálního analyzátoru a nastaví se na střední frekvenci (Center Frequency) 10 MHz, šířku pásma (Span) 1 MHz a referenční úroveň 10 dBm. V posledním kroku se aktivuje funkce přesného měření frekvence pomocí čítače (Counter Marker). Potenciometr se nastaví od minimální hodnoty k maximální po jednom kroku. V každém kroku se nastaví digitální potenciometr a z měří se výstupní frekvence. Postup se opakuje, dokud není dosaženo optimální hodnoty dle měřicího předpisu.

Blokové schéma

Schéma je ve stejné konfiguraci jako v předchozí kapitole (Obr. 3.10).

Vývojový diagram

Řídicí počítač nastaví na zdroji napětí a proud. Dále nastaví spektrální analyzátor. Poté se nastaví na potenciometru minimální hodnota a změří se frekvence. Naměřená hodnota se vypočte podle vzorce (4). Pokud vypočtená frekvence neodpovídá definovaným limitům, pak hodnotu na potenciometru postupně zvyšujeme o jeden krok. To se opakuje, dokud výstupní frekvence neodpovídá hodnotě z měřicího předpisu nebo se dosáhne maximální možné hodnoty nastavení. Aktuální nastavení pozice digitálního potenciometru a vypočtená frekvence včetně vyhodnocení dle limitů se zapíší do protokolu.



Obr. 3.15 Vývojový diagram (měření 4)

Výpis do protokolu

Na Obr. 3.16 je výsledek měření 4. Nastavení frekvence bylo přesných 10 MHz a nastavení potenciometru bylo na pozici 543.

3.2 Frequency calibration

Freq.Counter	Nominal	FLL	FUL	Actual
SPA1	10.0e6Hz	-0.1 Hz	+0.1 Hz	0.00 Hz
	512	400	650	543

Obr. 3.16 Výpis do protokolu (měření 4)

3.9.6 Měření výstupní úrovně OCXO při 10 MHz (měření 5)

V tomto měření je potřeba změřit výstupní úroveň OCXO při 10 MHz. Na napájecím zdroji se nastaví napětí na 11 V a omezení proudu na 500 mA. Spektrální analyzátor se nastaví na CENTER frekvenci 10 MHz, SPAN 1 MHz a referenční úroveň 10 dBm. Jako poslední se aktivuje MARKER.

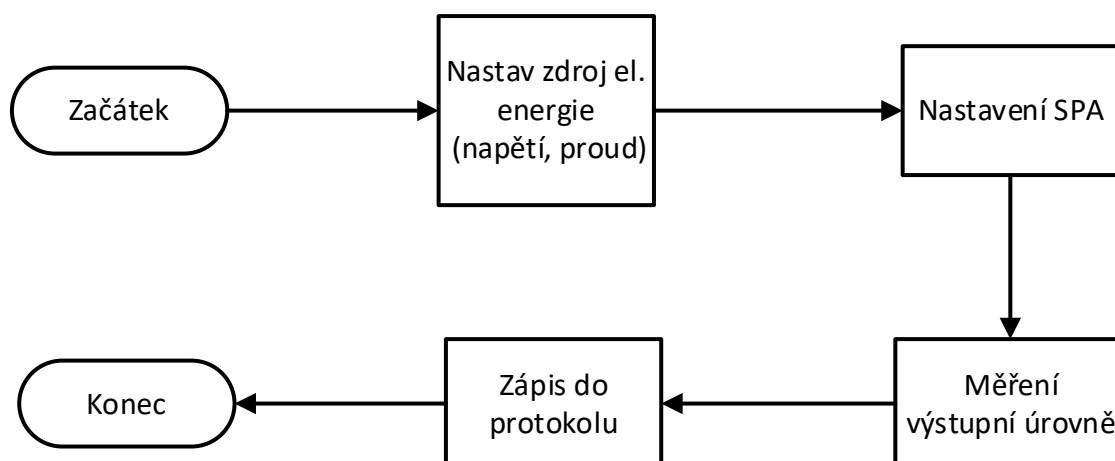
(Před zahájením měření se změří útlum cesty ze SPA ke konektoru DUT. Tím je zajištěno přesné odečítání hodnot výstupní úrovně DUT.)

Blokové schéma

Schéma je ve stejné konfiguraci jako v předchozí kapitole (Obr. 3.10).

Vývojový diagram

Řídicí počítač nastaví na zdroji napětí a omezení proudu. Následuje nastavení spektrálního analyzátoru. Po nastavení spektrálního analyzátoru se změří hodnota výkonové úrovně a zapíše se do protokolu. Po zapsání hodnoty se vyhodnotí, zdali je naměřená hodnota v rámci tolerancí daných měřicím předpisem.



Obr. 3.17 Vývojový diagram (měření 5)

Výpis do protokolu

Na Obr. 3.18 je výsledek pro měření 5. Výstupní úroveň vyšla 7,4 dBm, to je v přepočtu na výkon 5,5 mW.

3.3 Frequency OCXO level at 10 MHz

Freq.	Test point	Device	FLL / dBm	FUL / dBm	Actual / dBm
10 MHz	Xxx	SPA1	4.0	10.0	7.4

Obr. 3.18 Výpis do protokolu (měření 5)

3.10 Zápis dat do EEPROM

Po úspěšném změření DUT se do EEPROM na DPS uloží hodnota potenciometru pro přesné nastavení frekvence (Kap. 3.9.5) a další potřebná data (sériové číslo apod.).

3.11 Předání do výroby

Proces výroby měřicího adaptéru a tvorby měřicího programu je ukončen předáním do výrobního oddělení. Tento proces je detailně popsán ve směrnících závodu Rohde&Schwarz a pomáhá udržovat i interně stejnou kvalitu produktů, jakou společnost zaručuje svým zákazníkům.

Kontrolu provádí nezávislí specialisté oddělení kvality. Jejich úkolem je zkontrolovat, zda je veškerá nutná dokumentace k dispozici. Zároveň výrobní oddělení testuje DPS pomocí dodaného programu a měřicího adaptéru. Pokud jsou všechny strany (výrobní oddělení, kontrola kvality) spokojené, podepíše se formální předání do výrobního oddělení a je možné použít měřicí adaptér na sériovou výrobu DPS.

Zhodnocení a závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout a realizovat měřicí přípravek, měřicí program a měřicí systém, složený z přístrojů společnosti Rohde&Schwarz, pro měření parametrů OCXO oscilátoru. Výstupem měření je protokol s naměřenými hodnotami a vyhodnocením jednotlivých sledovaných parametrů oscilátoru.

Teoretická příprava se zabývá různými druhy krystalových oscilátorů, které využívají různé metody stabilizace frekvence generovaného signálu. Krystalové oscilátory mají široké uplatnění v měřicí technice. Každý typ má různé přednosti a s tím spojené využití pro rozdílné aplikace. Parametry oscilátorů významně ovlivňují výsledné vlastnosti přístrojů. Výběr vhodných kusů oscilátoru je proto zásadní a je nutné dodržet požadovanou kvalitu, proto jsou parametry OCXO oscilátorů před použitím ověřovány.

V sériové výrobě je proces testování nezbytné automatizovat a urychlit. K tomu slouží měřicí adaptér a měřicí systém, které DUT testují. Proces měření na měřicím pracovišti řídí měřicí program, který zapisuje a vyhodnocuje výsledky měření do protokolu. Měřicí pracoviště je obsluhováno proškoleným pracovníkem nebo je obsluhováno automatickým robotem.

Základním kamenem pro přípravu měřicího procesu je měřicí předpis, který popisuje funkce DUT a způsob kontroly jednotlivých parametrů. Na základě této dokumentace se vytvoří návrh měřicího pracoviště a měřicí postupy. Podle požadovaných parametrů se zvolí měřicí přístroje, které nejsou součástí standardizovaného testovacího zařízení. Pro připojení DUT k měřicímu pracovišti je nutné navrhnout a vyrobit měřicí adaptér. Podle stanovených měřicích postupů se naprogramuje měřicí program, který ovládá testovací zařízení a přidávané měřicí přístroje a zaznamenává výsledky do měřicího protokolu. Správná funkčnost výsledného měřicího systému se před předáním do sériové výroby vyhodnotí porovnáním měřicího protokolu s měřicím předpisem.

V tomto konkrétním případě byl podle standardizovaných postupů navržen a vyroben měřicí adaptér a implementován měřicí program pro OCXO oscilátor. Měření bylo verifikováno podle příslušného měřicího předpisu.

Výsledkem měření odebíraného proudu při napájecím napětí 11 V byla hodnota 289 mA. Tato hodnota se měla pohybovat mezi 100 mA a 400 mA. Měření odchylky od nominální frekvence OCXO oscilátoru při variabilním napájecím napětím byly definované limity ± 10 Hz. Naměřená hodnota byla -0,03 Hz. Naměřená a vypočtená hodnota změny frekvence při jednom kroku digitálního potenciometru nastavujícím OCXO oscilátor byla 0,021 Hz.

Definované limity byly od 0,01 Hz do 0,1 Hz. Pracovní frekvence OCXO oscilátoru nastavená pomocí digitálního potenciometru, byla na výstupu přesně 10000000,00 Hz. Přísné limity pro odchylku od nominální frekvence signálu činili od -0,1 Hz do 0,1 Hz. Posledním měřením je výstupní úroveň při frekvenci 10 MHz. Limitní hodnoty byly stanoveny na 4 dBm a 10 dBm. Naměřená hodnota byla 7,4 dBm což je v přepočtu 5,5 mW. Po změření se uloží nastavená hodnota potenciometru do paměti EEPROM, která je součástí měřené desky OCXO. Protokol s naměřenými a vyhodnocenými výsledky testovaného DUT je uveden v příloze.

Výsledky splňovaly všechny limitní požadavky. Po otestování měřicího přípravku a měřicího systému se do výrobního oddělení předaly měřicí adaptér, měřicí program a návod k obsluze. Měřicí systém pro testování OCXO se používá v sériové výrobě Rohde&Schwarz. Je nezbytným pro denní výrobu. Měření trvá 10 minut v rámci předepsaných podmínek.

Tento měřicí systém je možné dále optimalizovat. Jednou možností je připravit více pozic pro DUT na měřicím adaptéru. Takto by bylo možné měřit více DUT bez zásahu obsluhy. Další možností je použít k umístování DUT do měřicího adaptéru automatického robota. V obou případech by se mohl vyškolený měřicí technik věnovat technické práci s větší přidanou hodnotou jako například oprava nefunkčních DUT.

Literatura

- [1] Střední škola elektrotechnická, Ostrava, Na Jízdárně 30, p. o. [online]. Copyright ©i [cit. 08.03.2023]. Dostupné z: https://www.sse-najizdarne.cz/dokumenty/studijni_materialy/ov/uc_text_oscil%C3%A1tory.pdf
- [2] [online]. Copyright ©3z [cit. 08.03.2023]. Dostupné z: http://vf-elektronika-foto.cz/K5_files/097.pdf
- [3] What Is A VCXO? Voltage Controlled Crystal Oscillator - ECS Inc.. ECS Inc. International - ECS Inc. [online]. Copyright ©2023 ECS Inc. All Rights Reserved. [cit. 08.03.2023]. Dostupné z: <https://ecsxtal.com/what-is-a-vcxo-voltage-controlled-crystal-oscillator/>
- [4] VCXO circuit — WTL. crystal oscillator, Programmable Crysta, quartz crystal tuning fork, Quartz Crystal Filter, 32.768KHz, Saw Device, Ceramic Resonator_ WTL International Limited [online]. Copyright ©2023 WTL International Limited RESERVED [cit. 08.03.2023]. Dostupné z: <https://www.wtlcrystals.com/article/72/name/VCXO%2Bcircuit.html>
- [5] TCXO: How it works and typical fields of application - Jauch Blog. [online]. Copyright © 2018 [cit. 08.03.2023]. Dostupné z: <https://www.jauch.com/blog/en/tcxo-design-and-functionality/>
- [6] [online]. Dostupné z: https://www.vectron.com/products/literature_library/tutorial_on_tcxos.pdf
- [7] [online]. Dostupné z: <https://www.vectron.com/products/ocxo/ocxos.htm>
- [8] [online]. Dostupné z: <https://www.vectron.com/products/vcxo/vx-501.pdf>
- [9] Smart | Connected | Secure | Microchip Technology [online]. Copyright © [cit. 08.03.2023]. Dostupné z: <https://www.microchip.com/content/dam/mchp/documents/TCG/ProductDocuments/DataSheets/VT-800-April-2020.pdf>
- [10] [online]. Dostupné z: <https://www.vectron.com/products/ocxo/ox-204.pdf>
- [11] [online]. Dostupné z: https://www.tzb-info.cz/docu/texty/0001/000102_da_ad_prevodniky.pdf
- [12] Serial Peripheral Interface - Wikipedia. [online]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface

- [13] MTI-Milliren Technologies Inc. [online]. Copyright © [cit. 08.03.2023].
Dostupné z: http://www.mti-milliren.com/MTIPapers/Ext_Aging_Perf_Results.pdf
- [14] PC – Wikipedie. [online]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/I%C2%B2C>
- [15] [online]. Copyright ©3z [cit. 30.04.2023]. Dostupné z: http://www.vf-elektronika-foto.cz/K5_files/097.pdf
- [16] Connor-Winfield - On-line [online]. Copyright ©p [cit. 30.04.2023]. Dostupné z: http://www.conwin.com/pdfs/at_or_sc_for_ocxo.pdf
- [17] GPIB – Wikipedie. [online]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/GPIB>

Seznam tabulek

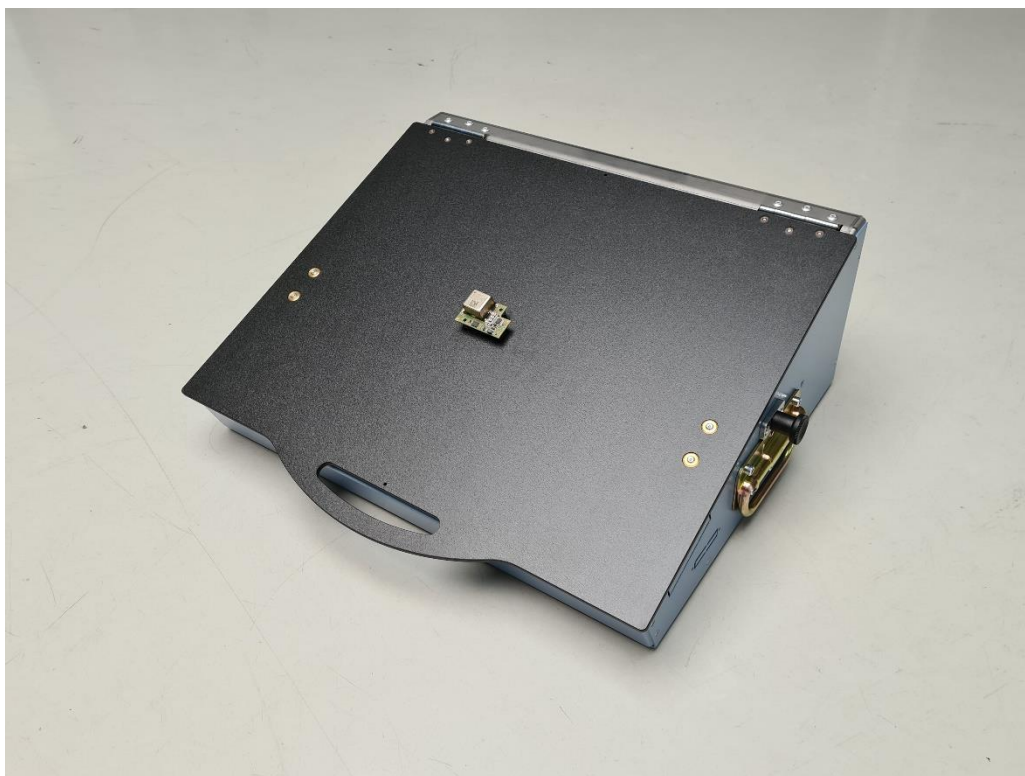
Tab. 2.1 Tabulka základních parametrů krystalových oscilátorů [8][9][10]	- 29 -
Tab. 2.2 Možné aplikace krystalových oscilátorů v různém frekvenčním rozsahu...	- 30 -
Tab. 2.3 Význam zkratek	- 30 -
Tab. 2.4 Výhody a nevýhody pro různé aplikace	- 31 -
Tab. 3.1 Limity pro měření odebíraného proudu	- 42 -
Tab. 3.2 Limity pro odchylky od nominální frekvence OCXO	- 43 -
Tab. 3.3 Limit po vypnutí OCXO na 1 sekundu	- 43 -
Tab. 3.4 Limit frekvence jednoho korku potenciometru	- 43 -
Tab. 3.5 Limit pracovní frekvence	- 43 -
Tab. 3.6 Limity pro kroky pro přesné naladění frekvence	- 43 -
Tab. 3.7 Limity pro výstupní úroveň	- 43 -
Tab. 3.8 Popis vstupů a výstupu na konektoru	- 45 -
Tab. 3.9 Popis vstupů a výstupu na potenciometru	- 46 -

Seznam obrázků

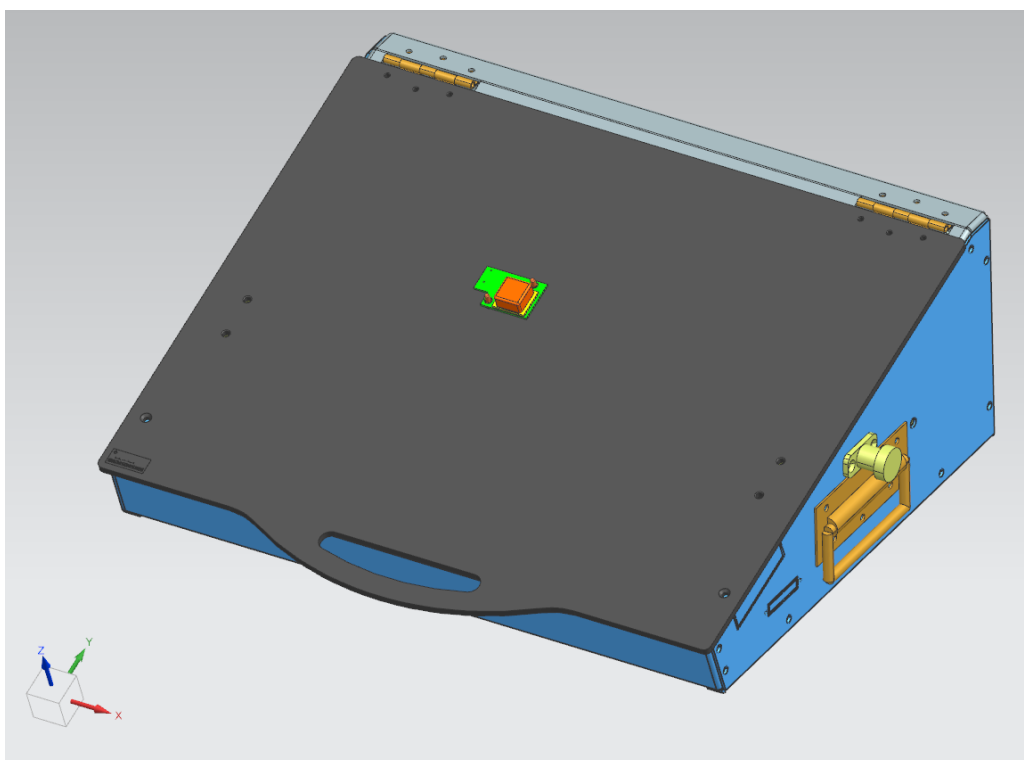
Obr. 2.1 a) schématická značka krystalu, b) náhradní obvod krystalu	- 12 -
Obr. 2.2 Změna rezonanční frekvence způsobenou přídatnou reaktancí [15]	- 13 -
Obr. 2.3 Změna rezonanční frekvence krystalu přidáním sériové a paralelní kapacity [15].....	- 14 -
Obr. 2.4 Řezy krystalu AT, SC a IT	- 15 -
Obr. 2.5 Porovnání teplotní závislosti rezonanční frekvence AT, IT a SC krystalů. f_{AT} , f_{IT} , f_{SC} – nominální oscilační frekvence jednotlivých krystalů [7].....	- 16 -
Obr. 2.6 Stárnutí oscilátoru: posun frekvence generovaného signálu v závislosti na dnech při různé teplotě.....	- 17 -
Obr. 2.7 Posun frekvence v závislosti na čase vlivem náhlé změny teploty [7].....	- 18 -
Obr. 2.8 Stabilizace oscilátoru po zapnutí a vypnutí [7]	- 19 -
Obr. 2.9 Základní schéma zapojení VCXO [4]	- 20 -
Obr. 2.10 Závislosti výstupní frekvence na řídicím napětí [3]	- 21 -
Obr. 2.11 Negativní polarita převodní funkce [3]	- 21 -
Obr. 2.12 Linearita [3]	- 22 -
Obr. 2.13 Blokové schéma zapojení TCXO [6].....	- 23 -
Obr. 2.14 Teplotní kompenzace TCXO [6]	- 24 -
Obr. 2.15 Schéma zapojení přímé kompenzace [6]	- 24 -
Obr. 2.16 Schéma zapojení nepřímé kompenzace [6]	- 25 -
Obr. 2.17 Proporcionální řízení pece OCXO [7]	- 26 -
Obr. 2.18 Blokové schéma OCXO	- 27 -
Obr. 2.19 Ladění výstupní frekvence OCXO v závislosti na teplotě uvnitř pece [7] -	27 -
Obr. 2.20 Znárodnění stabilizace frekvence oscilátoru po jeho zapnutí. f_{nom} – nominální frekvence oscilátoru [7]	- 28 -
Obr. 2.21 Minimální frekvence v daném teplotním rozsahu [7]	- 29 -
Obr. 2.22 Rozsah teplotní stability různých typů oscilátorů [6].....	- 30 -
Obr. 2.23 SPI sběrnice blokové schéma [12].....	- 33 -
Obr. 2.24 Blokové schéma I2C sběrnice [14].....	- 34 -
Obr. 2.25 Sítotisk	- 36 -
Obr. 2.26 Automatická osazovačka	- 37 -
Obr. 2.27 Průběžná přetavovací pec	- 37 -
Obr. 2.28 Optická kontrola	- 38 -

Obr. 2.29 Měřicí pracoviště	- 39 -
Obr. 2.30 Blokové schéma měřicího pracoviště	- 40 -
Obr. 2.31 Měřicí adaptér pro propojení DUT s testovacím zařízením	- 41 -
Obr. 3.1 Blokové schéma DPS	- 44 -
Obr. 3.2 Blokové schéma zapojení konektoru	- 45 -
Obr. 3.3 Potenciometr (vstupy a výstupy)	- 46 -
Obr. 3.4 Model DUT OCXO	- 47 -
Obr. 3.5 Kompletní model měřicího adaptéru s DUT	- 47 -
Obr. 3.6 Elektrické zapojení měřicího adaptéru	- 48 -
Obr. 3.7 Zapojení měřicího pracoviště (měření 1).....	- 49 -
Obr. 3.8 Vývojový diagram (měření 1)	- 50 -
Obr. 3.9 Výpis do protokolu (měření 1)	- 50 -
Obr. 3.10 Zapojení měřicího pracoviště (měření 2, 3 ,4 ,5).....	- 51 -
Obr. 3.11 Vývojový diagram (měření 2)	- 52 -
Obr. 3.12 Výpis do protokolu (měření 2)	- 52 -
Obr. 3.13 Vývojový diagram (měření 3)	- 53 -
Obr. 3.14 Výpis do protokolu (měření 3)	- 54 -
Obr. 3.15 Vývojový diagram (měření 4)	- 55 -
Obr. 3.16 Výpis do protokolu (měření 4)	- 55 -
Obr. 3.17 Vývojový diagram (měření 5)	- 56 -
Obr. 3.18 Výpis do protokolu (měření 5)	- 56 -

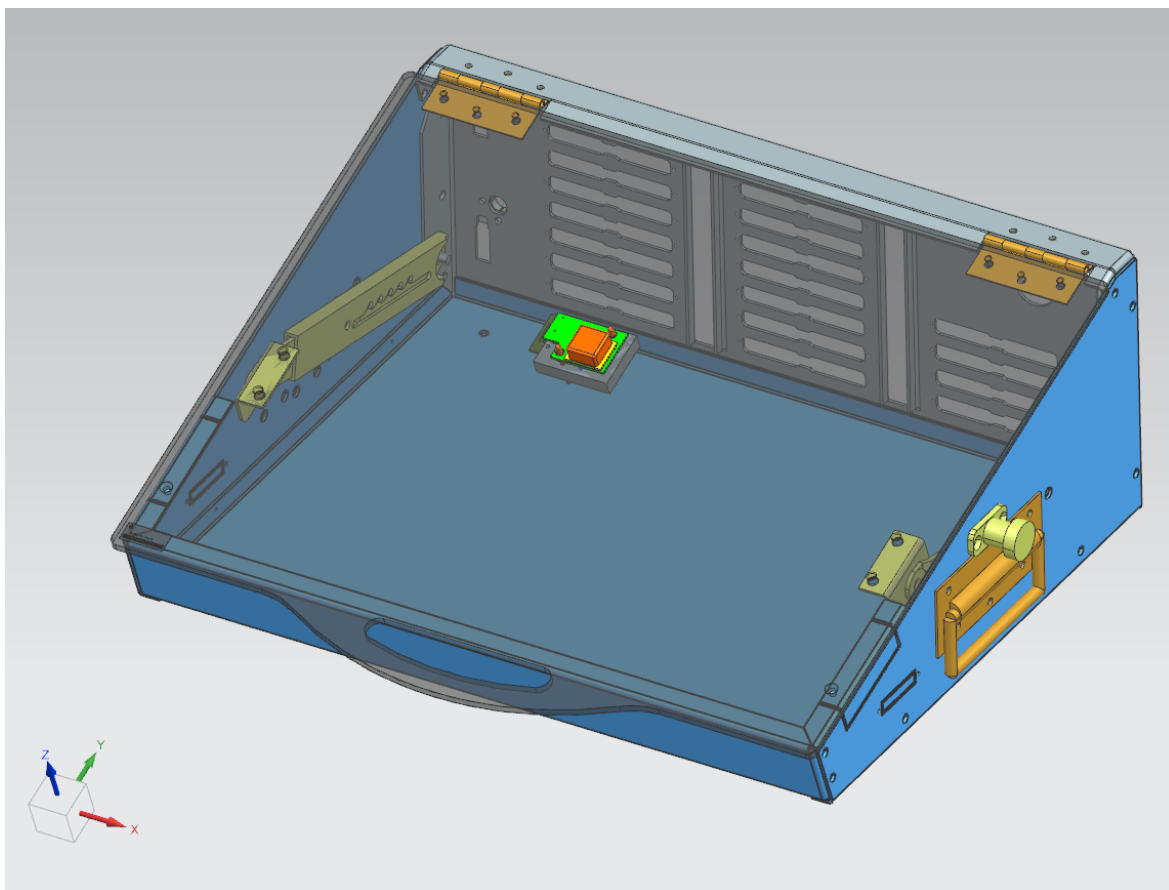
Přílohy



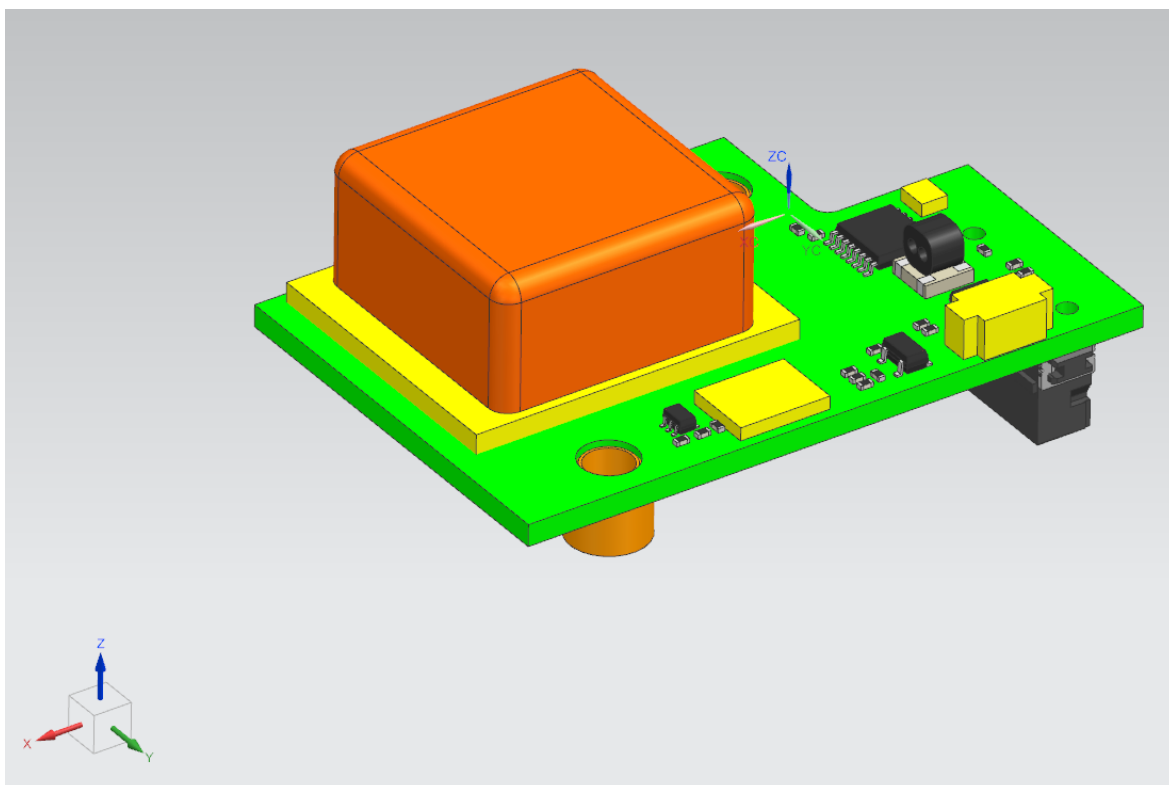
Příloha A: Plně funkční adaptér



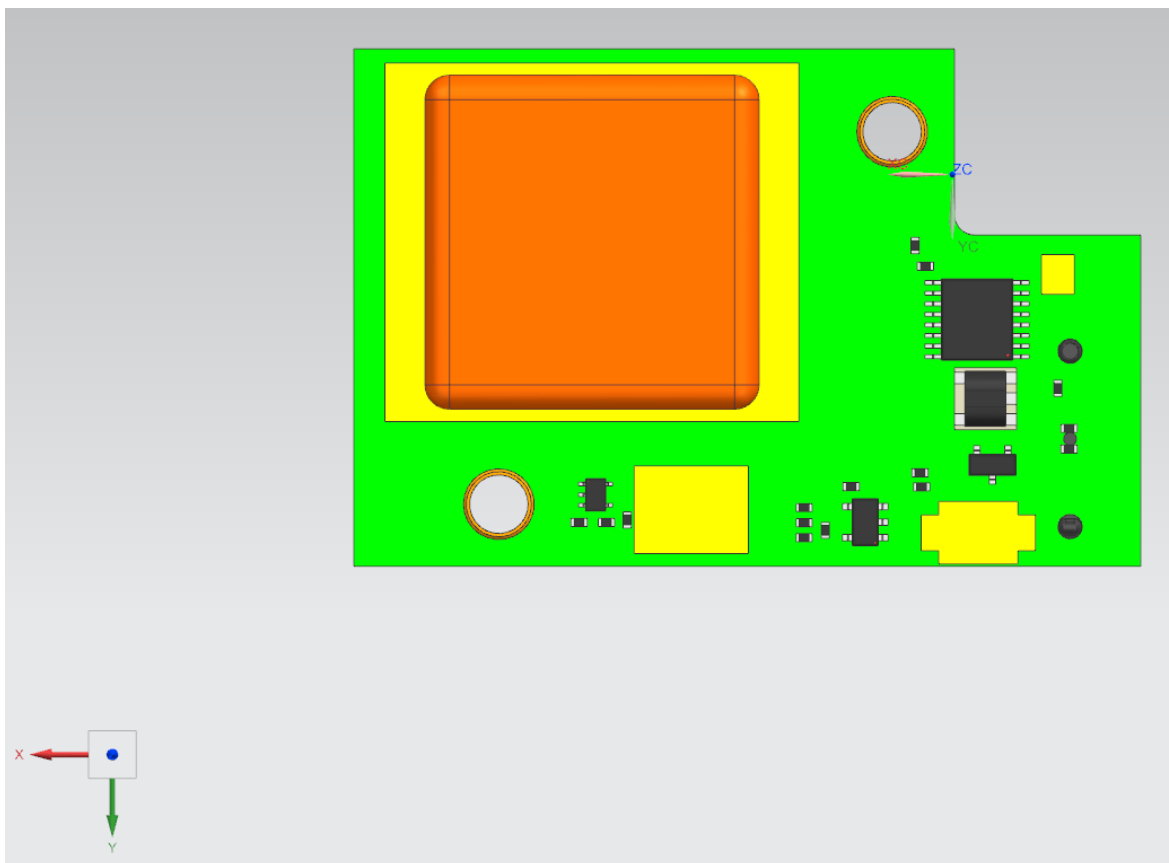
Příloha B: Model kompletního adaptéru s DUT



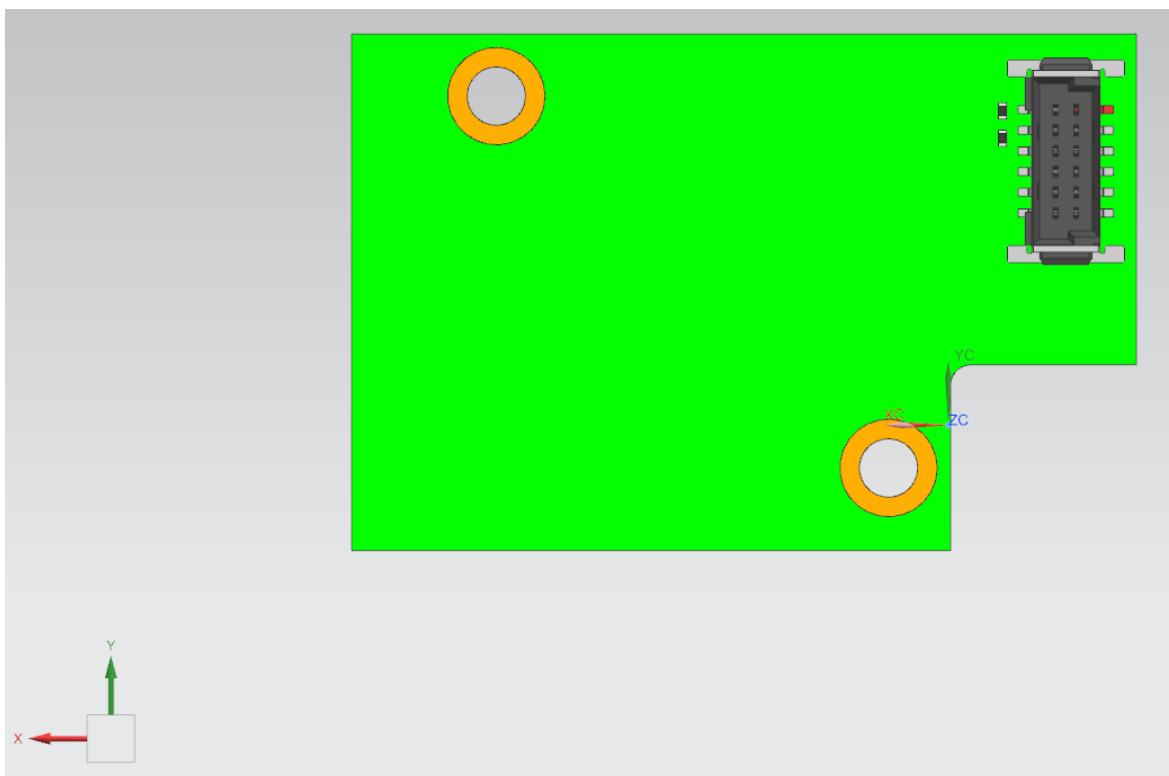
Příloha C: Model kompletního adaptéru s DUT (průhledný dekl)



Příloha D: Model OCXO DUT



Příloha F: Model OCXO DUT (pohled ze strany TOP)



Příloha E: Model OCXO DUT konektor (pohled ze strany BOT)

1 Current consumption

Voltage[V]	Power supply	Test point	FLL/mA	FUL/mA	Act./mA
+11V	PS1 CH1	xxx	100	400	289

2 Operation with different supply voltages

Freq.Counter	Voltage path	Voltage set/V	Output nom./Hz	FLL	FUL	Actual
SPA1	+11V	9.5	10.0e6	-10.0 Hz	+10.0 Hz -60.0 dBm	-0.03 Hz -82.9 dBm
SPA1	+11V	12.2	10.0e6	-10.0 Hz	+10.0 Hz -60 dBm	-0.03 Hz -85.2 dBm

3 Final Calibration after Warm-Up**3.1 Tune range**

	FLL / Hz	FUL / Hz	Actual / Hz
Delta frequency / Poti Step	0.010	0.100	0.021

3.2 Frequency calibration

Freq.Counter	Nominal	FLL	FUL	Actual
SPA1	10.0e6Hz 512	-0.1 Hz 400	+0.1 Hz 650	0.00 Hz 543

3.3 Frequency OCXO level at 10 MHz

Freq.	Test point	Device	FLL / dBm	FUL / dBm	Actual / dBm
10 MHz	Xxx	SPA1	4.0	10.0	7.4

4 EEPROM Header - D2

Příloha G: Ukázka výsledného protokolu