



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra mikroelektroniky**

**Návrh, realizace a ověření činnosti testeru (ICT) pro sériovou výrobu
modemu mikrovlnného spoje firmy RACOM**

Diplomová práce

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika

Studijní obor: Elektronika

Vedoucí práce: Ing. Vladimír Janíček, Ph.D.

Jakub Lněnička

Praha 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Lněnička** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **392921**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Elektronika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Tester ICT pro mikrovlnné modemy RACOM

Název diplomové práce anglicky:

ICT Tester for Microwave Modems

Pokyny pro vypracování:

1. Seznámit se s problematikou In Circuit Testing (ICT), konkrétně ve spojení s hardwarovými a softwarovými nástroji firmy National Instruments (NI) – DAQ měřicími kartami, LabVIEW.
2. Navrhnout a realizovat hardware elektronického adaptéru pro danou měřicí kartu NI.
3. Navrhnout a realizovat jehlové pole, sklolaminátovou desku kompatibilní s danou fixturou, umožňující spolehlivé a ergonomické uchycení a nakontaktování testované desky plošných spojů (DPS).
4. Zkompletovat testovací sestavu a navrhnout software v LabVIEW, který stejnosměrně otestuje osazenou DPS modemu, nahraje firmware do flash paměti, DPS oživi a funkčně otestuje.
5. Zhodnotit dosažené výsledky, případně navrhnout možná vylepšení konkrétního řešení. Vyhodnotit vhodnost použití metody ICT pro testování DPS podobného typu jako u zvoleného modemu, v sériové výrobě obecně, shrnout výhody a nevýhody, doporučit případná alternativní řešení.

Seznam doporučené literatury:

- 1) Bateson J. T. - In-Circuit Testing , ISBN 978-9401170116
- 2) Crouch A. - Design-For-Test For Digital IC's and Embedded Core Systems, ISBN 978-0130848277
- 3) Essick J. - Hands-On Introduction to LabVIEW for Scientists and Engineers, ISBN 978-0190211899
- 4) Bishop R., NI - LabVIEW Student Edition, ISBN 978-0134011332

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Vladimír Janiček Ph.D., katedra mikroelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **26.09.2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **09.01.2017**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Abstrakt

Tato práce je zaměřena na návrh a výrobu zařízení testování modemu mikrovlnného spoje firmy RACOM. V úvodu jsou popsány různé dostupné metody testování elektronických zařízení. Další část je věnována návrhu a výrobě in-circuit testeru, popisu jeho jednotlivých hardwarových částí a tvorbě měřicího programu. V závěru jsou uvedeny dosažené výsledky a je zhodnocen přínos zavedení ICT do výrobního procesu.

Klíčová slova

In-circuit test, mikrovlnný modem, fixtura, testování, LabVIEW.

Abstract

This document is focused on designing and manufacturing of a device for testing a microwave modem of the company RACOM. Introduction is devoted to various methods available for testing electronic devices. The next part describes the process of designing the in-circuit tester, focuses on its individual hardware parts and on creation of measuring software. The thesis is concluded by a summary of achieved results and the benefit of bringing ICT to the manufacturing process is evaluated.

Keywords

In-circuit test, microwave modem, fixture, testing, LabVIEW.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou prací „Návrh, realizace a ověření činnosti testeru (ICT) pro sériovou výrobu modemu mikrovlnného spoje firmy RACOM“ vypracoval samostatně a použil jsem k tomu pouze literaturu uvedenou v seznamu přiloženém k této diplomové práci.

V Praze dne

Jakub Lněnička

Obsah

Seznam použitých zkratk	7
1. Úvod	8
1.1 Testovací metody	9
1.1.1 Automatická optická inspekce (AOI)	9
1.1.2 Automatická Rentgenová inspekce (AXI)	10
1.1.3 Standard JTAG	10
1.1.4 Funkční test	10
1.1.5 In-circuit test (ICT)	11
1.1.6 Fixtureless in-circuit test (FICT)	11
1.2 Průzkum trhu	12
1.2.1 InCircuit Scorpion FiS640	12
1.2.2 Eagle MTS 180	13
1.2.3 SPEA 4080	13
2. Realizace	14
3. Fixtura	14
3.1 Měřicí karta	15
3.2 Jehlové lože	16
3.2.1 Impedanční vlastnosti jehel	17
3.3 Propojovací obvod	18
3.3.1 Konektory	20
3.3.2 Zdroje	22
3.3.3 Komparátory	29
3.3.4 Děličky taktovacích signálů	29
3.3.5 Obvod pro měření proudového odběru RTC	30
3.3.6 Čtečka čárového kódu	31
3.4 Deska plošných spojů	32
3.5 Měřicí program	32
3.5.1 Měřicí řetězec	35
3.6 Nahrání firmwaru	39
4. Závěr	41
Zdroje	43
Seznam obrázků	45
Přílohy	47

Seznam použitých zkratek

AOI	Automated Optical Inspection
AUX	Auxiliary
AXI	Automated X-ray inspection
DC	Direct Current
DUT	Device Under Test
EMC	Electromagnetic Compatibility
FICT	Pictureless In-Circuit Test
HW	Hardware
I2C	Inter-Integrated Circuit
ICT	In-Circuit Test
JTAG	Joint Test Action Group
LLDP	Link Layer Discovery Protocol
OSI	Open Systems Interconnection
PFI	Programmable Function Interface
PoE	Power over Ethernet
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
RF	Radio Frequency
RSS	Received Signal Strength
RTC	Real Time Clock
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SMA	SubMiniature version A
SMD	Surface Mount Device
SoC	System on Chip
SSH	Secure Shell
THT	Through Hole Technology
VHDCI	Very-High-Density Cable Interconnect

1. Úvod

Technologie pro výrobu elektronických zařízení, ať už se jedná o samotnou výrobu desek plošných spojů (DPS), nebo jejich osazování, se stále zkvalitňují a jejich chybovost klesá. Pro zachování spokojenosti zákazníků je však nutné zajistit stoprocentní funkčnost a spolehlivost prodávaneho výrobku a proto je testování zařízení stále velmi důležitou součástí výrobního procesu. Automatické testery, které sdružují funkce měřicích přístrojů, signálových generátorů i napájecích zdrojů, nabízejí vysokou rychlost testování a navíc velmi jednoduchou obsluhu.

RACOM s.r.o. je česká společnost zabývající se vývojem a výrobou zařízení pro bezdrátový přenos dat. Její současná řada výrobků se dělí podle použitých telekomunikačních technologií do tří kategorií. Rádiové modemy a GPRS/3G/4G routery se používají ve SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) a telemetrických systémech pro vodní hospodářství, energetiku, těžbu ropy a zemního plynu. Přenášejí také data v sítích pro dispečerské řízení vozidel, jako je například městská hromadná doprava, železnice nebo taxislužba, a také v transakčních sítích pro platební terminály nebo loterie. Mikrovlnné spoje (obrázek 1) pracují jako bezdrátový bridge a mohou být použity například poskytovateli internetu v páteřních sítích nebo jako vysokorychlostní spoje poslední míle. Firma má vlastní technologické centrum pro montáž SMD prvků i pro smíšenou montáž a také mechanickou výrobu. Všechny části výrobků procházejí několika úrovněmi kontrol a testů, před výstupní kontrolou je každý výrobek podroben komplexnímu zátěžovému testu v klimatické komoře [1].



Obr. 1: Mikrovlnný spoj RAY2

Zadáním práce je vytvořit automatický systém pro ožívování a testování modemů pro mikrovlnné spoje, zařaditelný do stávajícího výrobního procesu. Cílem je navrhnout a vyrobit tester, který sdruží úkony dosud prováděné manuálně za pomoci několika hardwarových i softwarových nástrojů do jedné jednoduché operace.

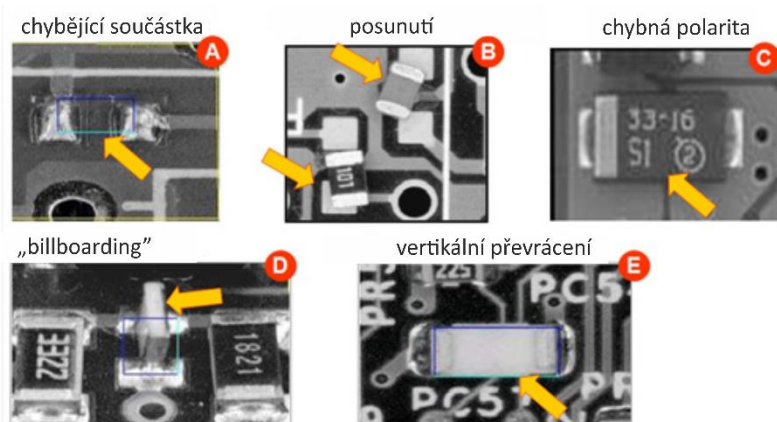
1.1 Testovací metody

S rozvojem automatizace výroby a osazování DPS se rozvinula i řada metod pro testování kvality implementovaných do různých fází výrobního procesu. Jejich účelem je odhalit jakékoliv vady výrobku, zjistit příčinu jejich vzniku a umožnit rychlou nápravu. Automatizací testovacích metod se předchází vzniku chyb zapříčiněných lidským faktorem, proces testování se mnohonásobně zrychluje a usnadňuje práci obsluhujícím pracovníkům.

1.1.1 Automatická optická inspekce (AOI)

Velmi rozšířenou metodou testování kvality DPS je automatická optická inspekce. Jedná se o sestavu několika kvalitních kamer nasměrovaných v různých úhlech na zkoumané zařízení schopných odhalit jak fatální chyby, jako například chybějící součástky, tak i špatné vzlínání cínu na vývody součástek, otočené komponenty nebo podle popisku na pouzdře i chybné osazení jiné součástky. Typické chyby odhalitelné optickou inspekcí jsou na obrázku 2.

AOI má několik variant podle fáze výrobního procesu, do které je zařazena. Rozlišuje se inspekce neosazené DPS, kontrola pájecí pasty (SPI - Solder Paste Inspection), pre-flow inspekce (zkoumá správné usazení komponent do pájecí pasty před pájením) a konečně post-reflow, tedy kontrola osazené DPS s připájenými součástkami [6].

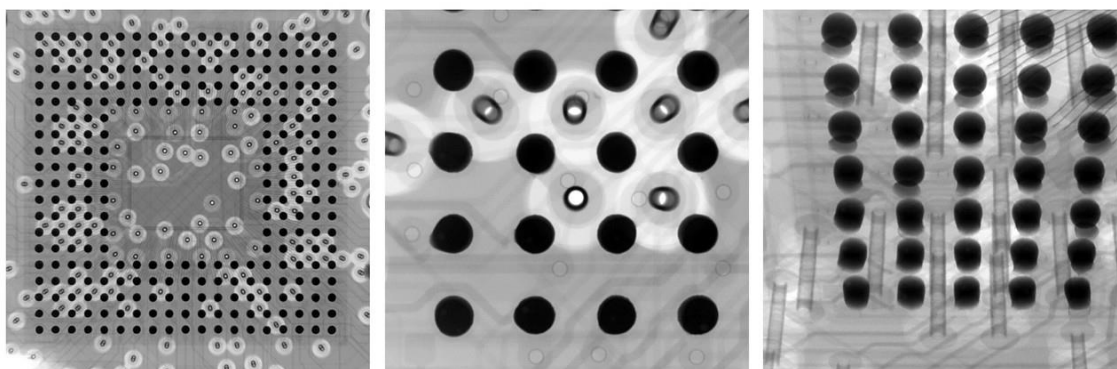


Obr. 2: Typický výsledek AOI [6]

1.1.2 Automatická Rentgenová inspekce (AXI)

Automatická Rentgenová inspekce je metoda vycházející z AOI. Využití rentgenových paprsků místo viditelného světla rozšiřuje možnosti inspekce o zkoumání artefaktů, které nejsou okem viditelné. Jedná se hlavně o integrované obvody v pouzdrech typu BGA, které mají vývody pod sebou, a znemožňují tak optickou inspekci. Příklad rentgenového snímku integrovaného obvodu v pouzdře BGA je na obrázku 3.

Záření pro AXI je generováno pomocí rentgenového zářiče, následně prochází zkoumaným objektem a je buď přímo zachyceno polem sensorů rentgenového záření, nebo prochází detektorem, který jej převede do viditelného spektra a umožní tak následné zpracování běžnými optickými prostředky [7].



Obr. 3: Typický rentgenový snímek pouzdra BGA [7]

1.1.3 Standard JTAG

JTAG (Joint Test Action Group) je standard definovaný primárně pro testování DPS a integrovaných obvodů. Umožňuje testování sběrnic, které nejsou přístupné kontaktním měřicím sondám. Pomocí speciálních registrů pro boundary scan, které jsou implementovány ve většině moderních digitálních integrovaných obvodů, je možné ovládat přímo logické úrovně na jejich jednotlivých vývodech. JTAG ale umožňuje například i zapisovat data do flash paměti [8].

1.1.4 Funkční test

Funkční test je praktikován v posledních fázích výrobního procesu elektronického zařízení. Probíhá v prostředí simulujícím podmínky, v kterých se předpokládá, že bude testované zařízení provozováno. Prostřednictvím uživatelských konektorů nebo jehlového lože

jsou připojeny periferie a zařízení je zatíženo podobně jako za plného provozu. Účelem funkčního testu je zjistit, zda zařízení funguje v rámci specifikací.

1.1.5 In-circuit test (ICT)

ICT je metoda testování osazených DPS schopná zkontrolovat přítomnost součástek, jejich orientaci, otestovat správnou hodnotu pasivních komponent, odhalit zkraty nebo rozpojení vzniklá chybným připájením součástek, či měřit základní obvodové veličiny a vyhodnotit, zda osazení DPS proběhlo v pořádku. Při testu se ke kontaktování bodů na DPS používají fixtury s odpruženými vodivými jehličkami. Testovaný výrobek (DUT - Device Under Test) se nejprve pomocí vodících kolíků přesně vystředí ve fixtuře a následně se zavřením víka fixtury se docílí pružného dosednutí jehliček na kontaktní body.

Velkou výhodou ICT je jeho variabilita a možnost kombinace s ostatními testovacími metodami. Během jednoho testu je pak možné ověřit správnost osazení součástek, nahrát firmware do paměti procesoru, vyzkoušet funkčnost datových rozhraní (ethernetu, USB, RS-232 a jiných) nebo provést boundary scan, a to vše v rámci jednoho úkonu operátora testeru, zahrnujícího vložení DUT do fixtury s jehličkovým ložem a spuštění testovacího programu.

Pro nemasovou výrobu je ICT zejména kvůli své flexibilitě ideální volbou. Je kvalitním doplňkem bezkontaktních metod (jako jsou AOI a AXI) a výborně se hodí ke konstrukci komplexního testeru s širokými možnostmi testování (zejména v kombinaci s využitím standardu JTAG). Jedná se nejen o testovací, ale i oživovací metodu, která je schopná sdružit několik doposud manuálně a zdlouhavě prováděných úkonů do jednoho plně automatického kroku. Výrazně snižuje vliv lidského faktoru a zároveň několikanásobně zrychluje proces prvotního oživení a základního otestování výrobku.

1.1.6 Fixtureless in-circuit test (FICT)

FICT je obdobou ICT, ke kontaktování měřících bodů ale nepotřebuje fixturu s jehlovým ložem, ale využívá technologii *flying probe*. Pomocí pohyblivé hlavy s jednou nebo více testovacími jehlami jsou postupně kontaktovány testovací body a prováděna jednotlivá měření. Jsou kladeny vysoké požadavky na přesnost dopadu testovacích jehel a na rychlost a přesnost pohybu měřicí hlavy a tím i na mechanické provedení testeru. Jeho hlavní výhodou je snadné přenastavení na testování nového výrobku. Jedná se o čistě softwarovou úpravu, při které tester automaticky vytvoří měřicí program na základě výrobních dat testovaného zařízení.

1.2 Průzkum trhu

Pro porovnání testeru navrženého a zkonstruovaného v rámci této práce s komerčně dostupnými in-circuit a funkčními testery byl vypracován popis několika takových komerčně dostupných zařízení. Jedná většinou o velmi komplexní přístroje s velkou modulárností a rozšiřitelností, součástí bývá i software pro snadnou tvorbu testovacích programů.

1.2.1 InCircuit Scorpion FiS640

Tento výrobek (na obrázku 4) kanadské firmy Acculogic poskytuje kompletní testovací řešení včetně boundary scanu a programování flash pamětí. Jeho velkou předností je možnost na základě výrobních dat DPS, netlistu a kusovníku automaticky vygenerovat testovací program, navrhnout rozložení jehel ve fixtuře a vygenerovat její výrobní data. Poskytuje také pokročilý systém analogových měření, schopný odhalit nesprávné hodnoty RF (Radio Frequency) komponent. Výměnou fixtury s jehlovým ložem lze velmi rychle přestavět zařízení pro testování jiné DPS [11].



Obr. 4: InCircuit Scorpion FiS640 [11]

1.2.2 Eagle MTS 180

In-circuit tester Eagle MTS 180 se chlubí vysokou rychlostí analogových měření (až 1000 měření za vteřinu) a velmi krátkými přívodními vodiče k jehlovým kontaktům, zaručuje tak dobrou signálovou integritu. Umožňuje rovněž funkční testy, boundary scan a zápis do flash pamětí. Fixtura má mechanický přítlak a oproti vakuovým fixturám je tak mnohem levnější. Celkově se jedná o tester z nižší cenové kategorie pouze se základními funkcemi, ale umožňuje snadnou výměnu fixtur, které jsou navíc velmi jednoduché na návrh a výrobu, a hodí se tak pro menší firmy s nemasovou produkcí [13].



Obr. 5: Eagle MTS 180 [13]

1.2.3 SPEA 4080

SPEA 4080 je zástupcem testerů s technologií flying probe, který dokáže kontaktovat měřicí body o velikosti 50 μm s rychlostí až 160 dotyků za vteřinu. Jeho velkou výhodou je jeho snadné přenastavení mezi testy různých DPS a také schopnost automaticky vložit, usadit a otestovat DPS ze zásobníku nebo přímo z výrobního pásu. Kvůli technologii flying probe se ale nehodí k nahrávání firmwaru a k funkčním testům. S půdorysem 2,2 m² jde také o velmi velké, těžké a drahé zařízení (viz obrázek 6) [12].



Obr. 6: Tester SPEA 4080 [12]

Komerčně dostupné testery nabízejí většinou pokročilejší funkce, než jakých je možno dosáhnout při konstrukci testeru vlastního. Jejich největší nevýhodou je vysoká cena, která mnohonásobně převyšuje náklady na návrh a výrobu testeru navrženého v rámci této práce. I pro komerční ICT je navíc stále nutné vytvářet nové fixtury pro každou testovanou DPS. Pro nemasovou výrobu, ve které se testovaný výrobek nemění v řádu měsíců až let je tak výhodnější volbou realizace aplikačně specifického testeru, do kterého je možné implementovat podle potřeby i další funkce pro oživení výrobku.

2. Realizace

Základním požadavkem na tester konstruovaný v rámci této práce je replikovat a zautomatizovat stávající postup oživení a základního otestování modemu pro mikrovlnný spoj RAY2. Využití metody ICT navíc přináší možnost uskutečnit i nová měření, která jsou pro manuální testování buď příliš zdlouhavá, komplikovaná nebo vyžadují pokročilé měřicí přístroje.

Kompletní tester tvoří několik hardwarových částí. Základem je fixtura pro ukotvení a vycentrování DUT a pro upevnění jehlového lože. Jehly jsou vodivě připojeny k propojovacímu obvodu, který slouží k napájení DUT, řízení měřicího procesu a úpravě signálů z modemu, aby mohly být zpracovány měřicí kartou.

3. Fixtura

Základem celého testeru je fixtura *Prüfadapter Typ 127* německé firmy *Reinhardt Testsystem* o rozměrech 28 x 33 x 23 cm a váze 9 kg. Do víka fixtury je možné umístit buď rastr přítlačných nylonových šroubů, anebo druhé jehličkové lože, fixtura tak dovoluje měřit součástky na obou stranách desky modemu. K přesnému slícování spodní a svrchní části jehlového lože slouží sestava kloubů, pístů a ložisek a 2 poziční kolíky umístěné na stranách laminátů s jehlami. Přítlačná síla fixtury je 1000 N, maximální počet jehliček je 500 [14].

Ve spodní části fixtury je prostor, ve kterém je možné uzavřít propojovací obvod, do něhož jsou ze zadní části přivedeny datové, měřicí a napájecí kabely. Schránka je zkonstruována z masivního plechu, funguje tak zároveň jako stínění a zlepšuje EMC (elektromagnetickou kompatibilitu) testeru.



Obr. 7: Fixtura Prüfadapter Typ 127 [14]

3.1 Měřící karta

Měřící karta NI PCIe-6353 disponuje 32 analogovými vstupy s maximální vzorkovací frekvencí 1,25 MS/s, rozlišením 16 bitů a rozsahem ± 10 V, dále čtyřmi analogovými výstupy, 48 digitálními vstupy/výstupy a čtyřmi 32 bitovými čítači. Vnitřní časová základna má frekvenci 100 MHz, což odpovídá časovému rozlišení 10 ns. Přenos dat mezi počítačem a kartou probíhá pomocí přímého přístupu do paměti (DMA - Direct Memory Access). Obslužný měřící program je vytvořen v grafickém programovacím jazyce LabVIEW.

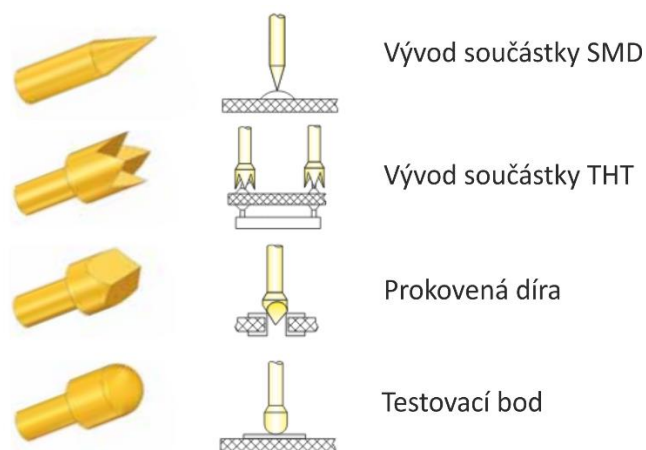


Obr. 8: Měřící karta NI PCIe-6353

3.2 Jehlové lože

Testovací jehly jsou v navrženém motivu ukotveny do děr navrtaných v laminátu, který je přišroubován do fixtury. Jehlové lože se skládá ze spodní a svrchní části a tedy dvou nezávislých laminátů. Rozložení jehliček vychází z motivu plošného spoje modemu a je unikátní pro danou verzi DPS. K rozvržení jehlového rastru byl použit software pro návrh plošných spojů PADS.

Návrh rozložení byla jedna z nejnáročnějších částí celého projektu. Současná verze modemu ještě není na ICT připravena, DPS postrádá testovací body, které se běžně na výrobcích podrobovaných ICT připravují pro ulehčení kontaktování. Jehla dosedající na testovací bod má lepší kvalitu kontaktu (menší přechodový odpor) a také lepší toleranci nepřesností vycentrování DUT ve fixtuře. Místo testovacích bodů tak bylo nutné jehly kontaktovat na prokovené otvory nebo přímo na vývody součástek. Problém může vzniknout u součástek v pouzdře s malým rozstupem vývodů a u velmi malých prokovených děr; kontaktování těchto artefaktů vyžaduje vysokou přesnost vystředění DUT ve fixtuře dosaženou pomocí velkého množství kvalitních středících kolíků. U prokovených děr je navíc třeba zajistit, aby nebyly překryté nepájivou maskou. Porovnání hrotů jehel je na obrázku 9.



Obr. 9: Porovnání různých typů testovacích jehel [5]

Do laminátu jsou vyvrtány díry pro dva typy jehliček o průměrech 40 milů (1.016 mm) a 75 milů (1.905 mm), dále díry se závitem pro přitlačné nylonové šrouby M4, otvory pro vodící kolíky a šrouby pro upevnění laminátu do fixtury, průhled a otvory pro uchycení čtečky čárového kódu a otvory pro součástky s vysokým profilem, jako jsou konektory a cívky.

3.2.1 Impedanční vlastnosti jehel

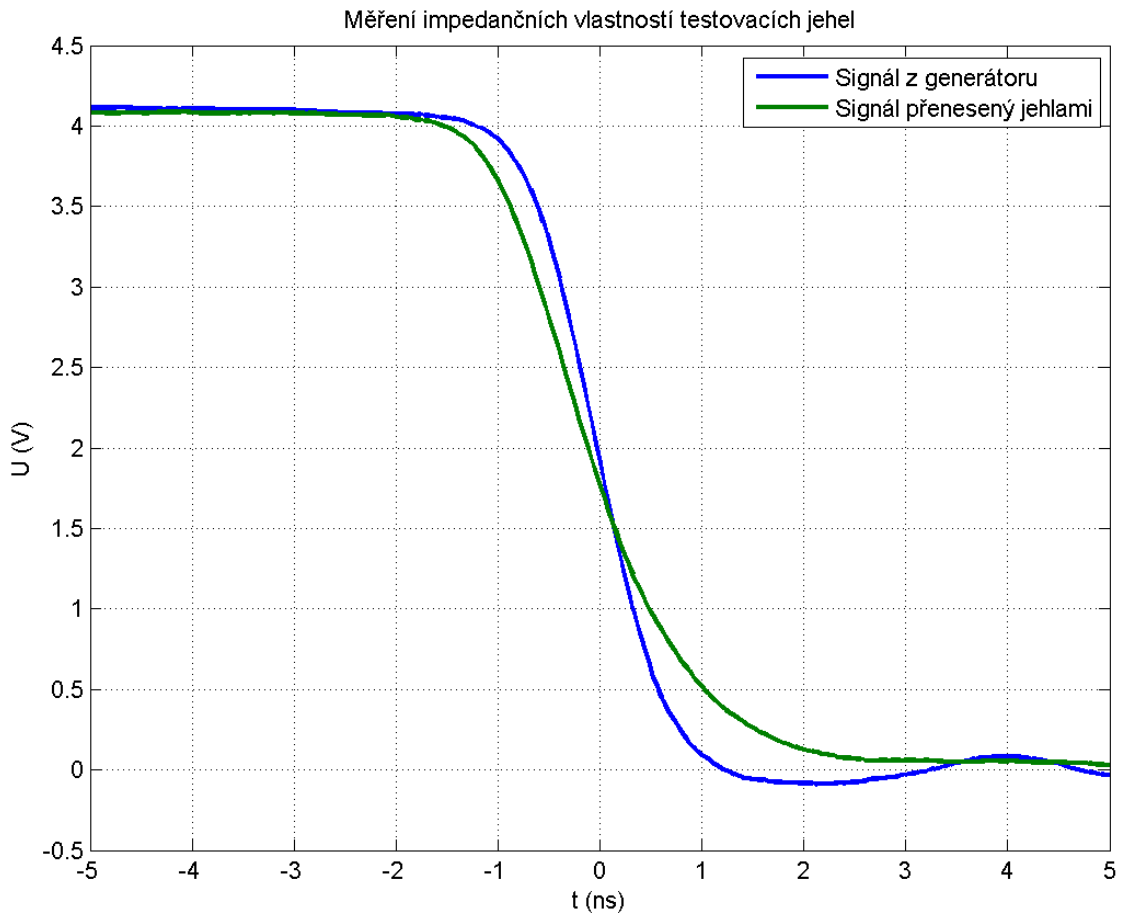
V rámci prozkoumání možností jehel přenášet rychlé digitální i analogové signály byly změřeny jejich impedanční vlastnosti. Signál z generátoru o frekvenci 10 MHz byl upraven hradlem do tvaru obdélníku o napěťové úrovni TTL (Transistor-Transistor-Logic) a byl změřen osciloskopem po průchodu měřicím přípravkem na obrázku 10. Jedná se o 2 hliníkové plechy spojené mosaznými distančními sloupky, ve vrchním plechu jsou umístěny dva konektory SMA, k nimž jsou připájeny testované jehly. Ve spodním plechu je upevněn obvod pro tvarování signálu (napájený z 5V zdroje), na jehož vstup je koaxiálním kabelem přiveden signál z generátoru. Tvary signálu přeneseného jehlami a signálu změřeného osciloskopem přímo na výstupu tvarovacího obvodu jsou porovnány na obrázku 11.



Obr. 10: Měřicí přípravek

Z výsledků měření je patrné zpomalení signálu na sestupné hraně z 1,2 ns na 1,9 ns. Závěrem měření tedy je, že testovací jehly jsou bez problému použitelné pro přenos digitálního signálu do frekvence přibližně 250 MHz (2ns náběžná a 2ns sestupná hrana). V rámci navrhovaného testeru se signály s nejvyšší frekvencí vyskytují na ethernetovém rozhraní, jehly jsou kontaktovány na vývody konektoru a jsou použity k datovým přenosům. Frekvence signálů činí pro ethernet standardu 100BASE-T i standardu 1000BASE-T shodně 125 MHz.

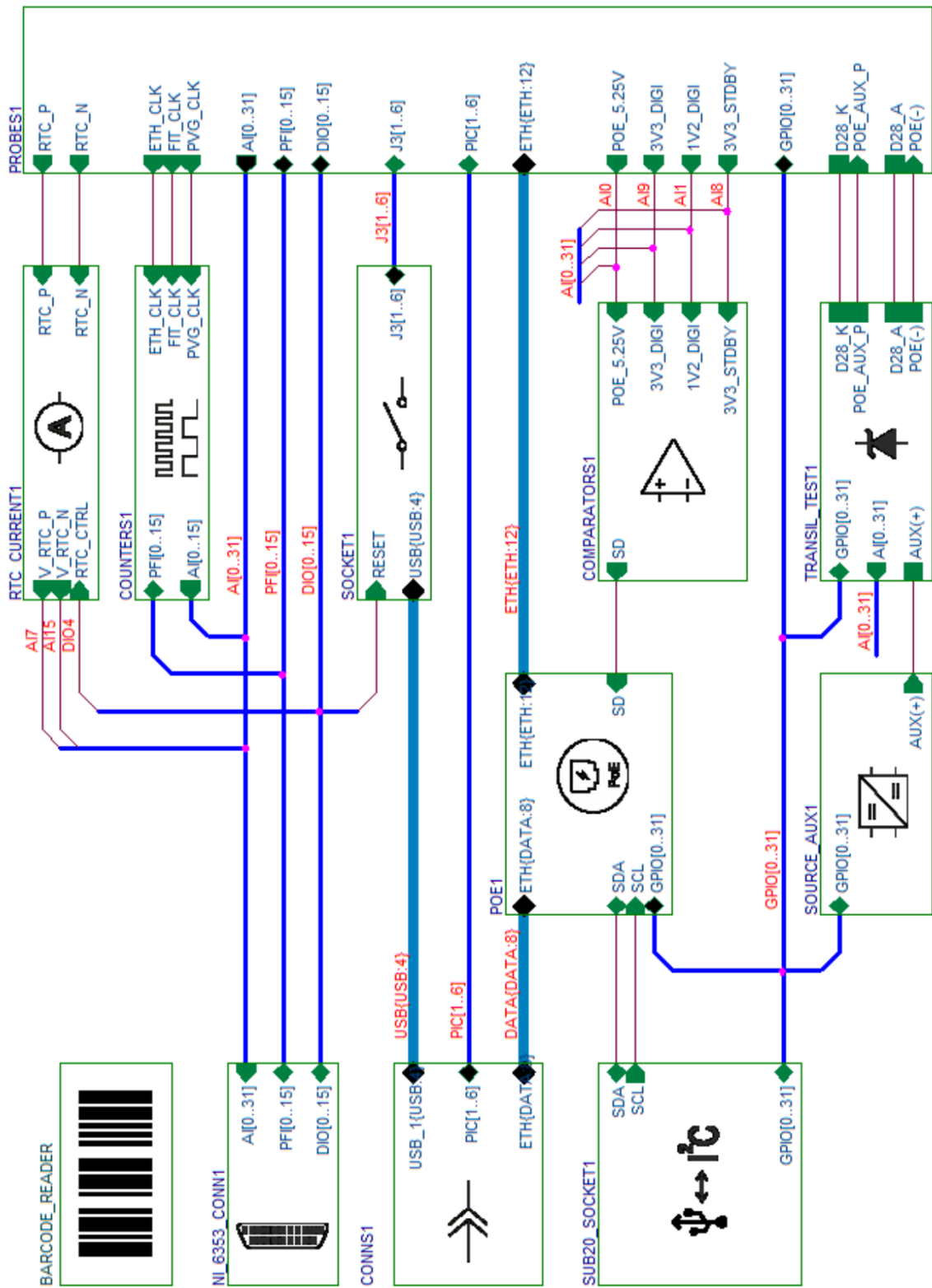
Jehly jsou využity také k napájení celého DUT, je tak velmi důležitý i jejich stejnosměrný odpor. Podle katalogu výrobce je jejich maximální proudová zátížitelnost 2 A a odpor kontaktu je menší než 20 mΩ [5]. Při napájení ze zdroje PoE (57 V) je proudový odběr modemu kolem 150 mA a přechodový odpor na kontaktech nehraje téměř žádnou roli. Pro napájení z přídatného zdroje (18 V a více) je odebíraný proud vyšší a jehly jsou pro jistotu zdvojeny.



Obr. 11: Výsledek měření impedančních vlastností jehel

3.3 Propojovací obvod

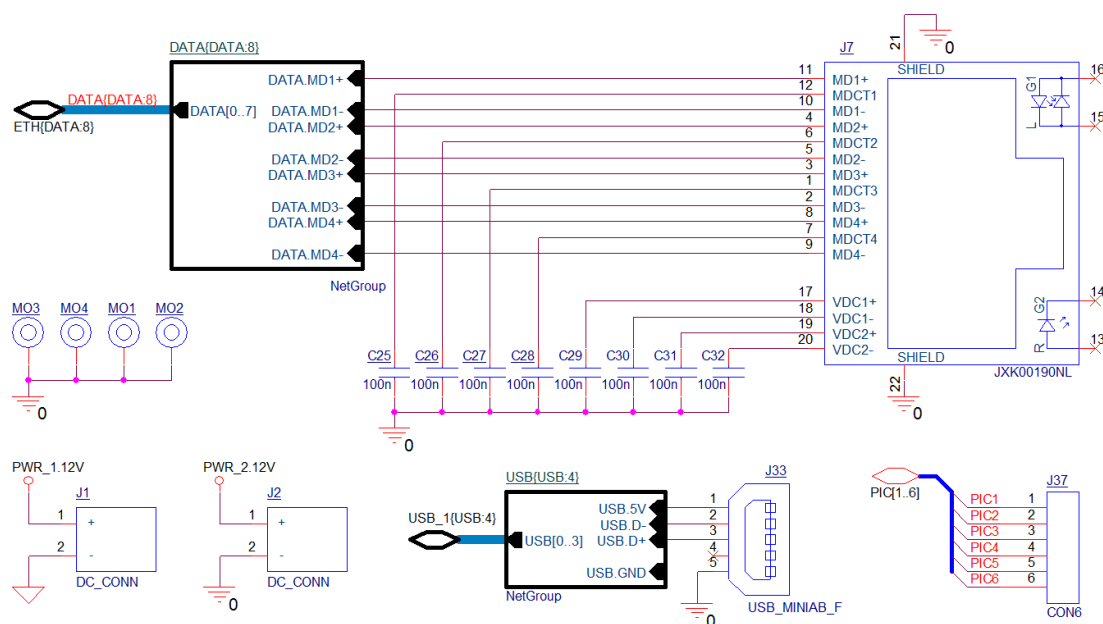
Propojovací obvod leží mezi fixturou a měřicí kartou NI PCIe-6353. Zajišťuje napájení DUT z jednoho ze dvou stejnosměrných spínaných zdrojů a propojení řídicích i měřených signálů mezi DUT a měřicí kartou. Návrh propojovacího obvodu je realizován v prostředí OrCAD, zahrnuje i vytvoření vlastní knihovny schematických značek a pouzder součástek podle jejich katalogových listů. Schéma zapojení je pro větší přehlednost vytvořeno hierarchicky, blokové schéma nejvyšší úrovně je na obrázku 12.



Obr. 12: Blokové schéma propojovacího obvodu

3.3.1 Konektory

Základní částí je blok PROBES1, který obsahuje konektor pro připojení všech potřebných signálů z DUT k propojovacímu obvodu. Jedná se o 32-pinovou dvouřadovou kontaktní lištu, na kterou jsou přivedeny vodiče z jednotlivých testovacích jehel zakončené dutinkovým konektorem. Blok CONN1 (na obrázku 13) obsahuje konektor ethernetového rozhraní RJ-45, dva sousedící napájecí konektory, konektor pro programátor PICKIT 3 a USB konektor pro nahrání pro prvotní bootování procesoru v modemu.

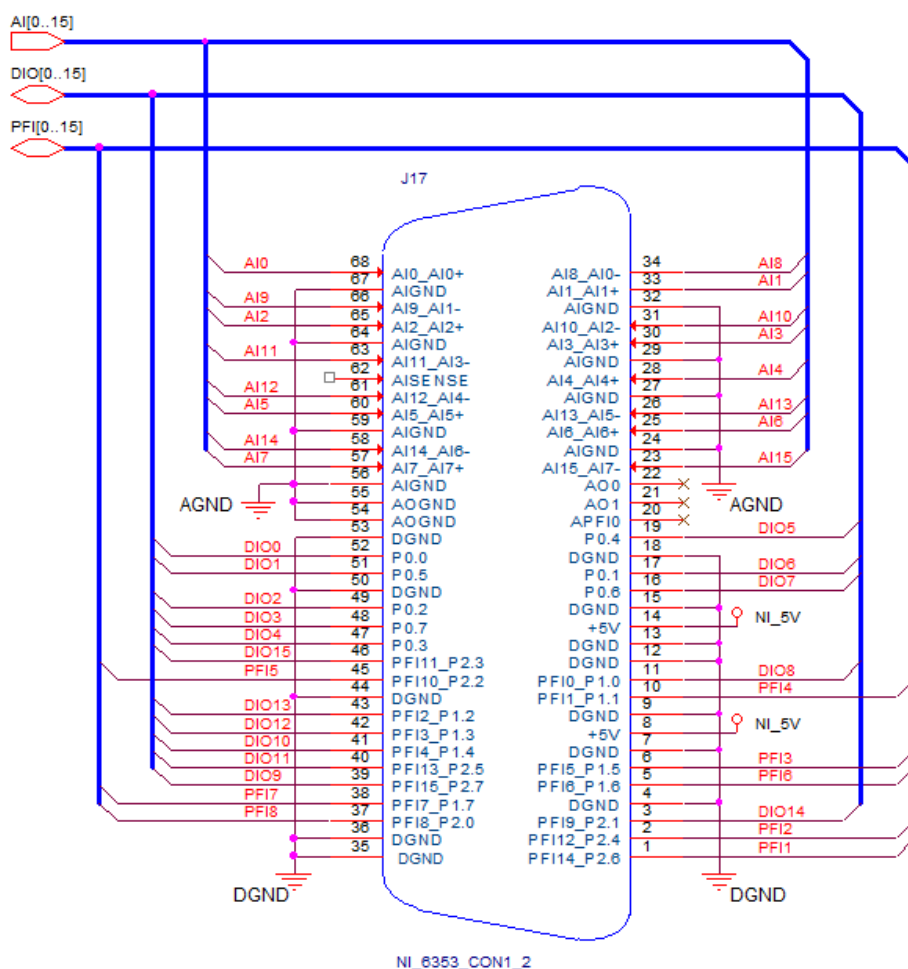


Obr. 13: Konektory měřícího obvodu (blok CONN1)

3.3.1.1 Konektor měřící karty

Měřící karta NI-6353 je připojena k propojovacímu obvodu prostřednictvím 68-pinového VHDCI (Very-High-Density Cable Interconnect) konektoru. Schéma zapojení konektoru je na obrázku 14. Signály stejného typu jsou v OrCADu pro větší přehlednost sdruženy do sběrnicových vodičů. Některé z vstupně výstupních pinů jsou programovatelné a jsou zapojeny do sběrnice PFI (Programmable Function Interface), ostatní jsou sdruženy jako vstupně výstupní brány do sběrnice DIO (Digital Input-Output). Na konektoru je také vyveden 5V výstup, který je využit k napájení některých obvodů na propojovací desce. Analogové výstupy nejsou zapojeny a jsou ponechány plovoucí. Digitální a analogová zem je spojena na

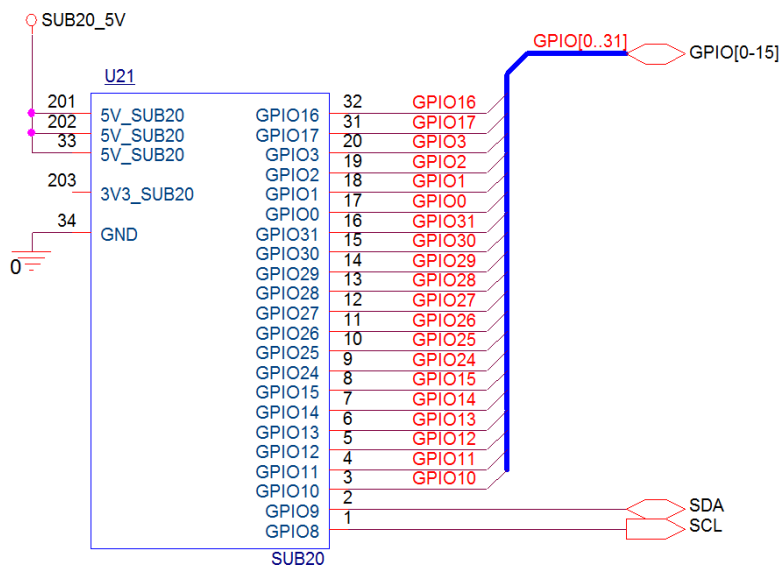
DPS propojovacího obvodu rozlitou mědí v jedné z vnitřních vrstev. Karta disponuje ještě druhým kabelem s podobnými vstupy a výstupy, pro danou aplikaci je ale dostačující jeden.



Obr. 14: Zapojení měřicí karty (blok NI6353_CONN1)

3.3.1.2 Převodník SUB-20

Hlavní funkcí převodníku SUB-20 je zprostředkování komunikace mezi počítačem a kontrolérem zdroje PoE (Power over Ethernet) na propojovací desce. Obsahuje ale i univerzální digitální piny, z nichž některé jsou využity ke spínání relé a tranzistorů v propojovacím obvodu. Převodník je USB kabelem připojen k počítači a je stejně jako měřicí karta ovládán prostřednictvím LabVIEW. Na DPS je zasazen do patice vytvořené z dutinkových lišt a je mechanicky zajištěn distančními šrouby.

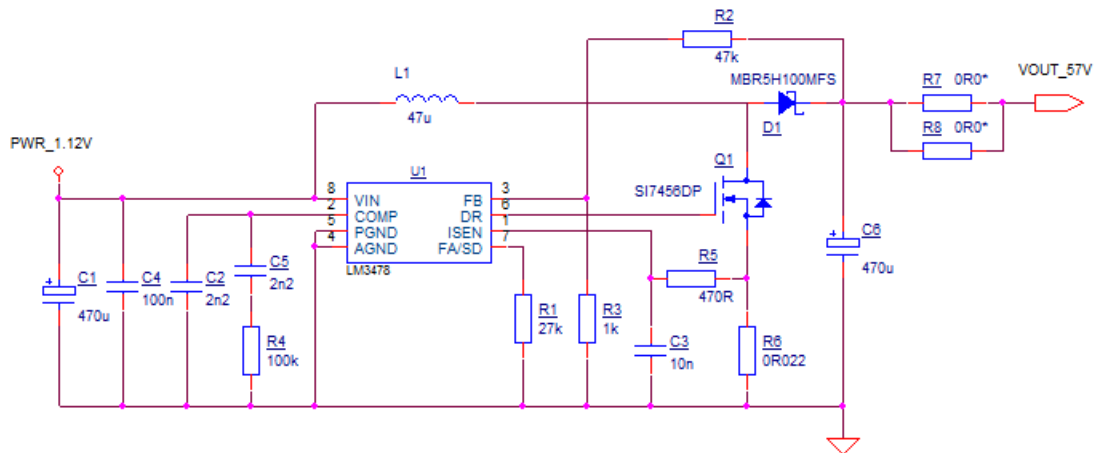


Obr. 15: Zapojení převodníku SUB-20 (blok SUB20_SOCKET1)

3.3.2 Zdroje

Modem je možné napájet z jednoho ze dvou nezávislých zdrojů. První možností je napájení po ethernetovém kabelu ze zdroje PoE, který musí být podle standardu 802.3at [2] galvanicky oddělený a jeho výstupní napětí musí ležet v rozmezí 50 - 57 V. Další možností je napájení z přídatného zdroje, který podle katalogových údajů mikrovlnného spoje RAY2 musí mít napětí mezi 20 V a 60 V a rovněž musí být plovoucí. Přepínání mezi těmito dvěma zdroji si modem řídí pomocí vlastní logiky na základě velikosti jejich napětí. Propojovací obvod testuje funkčnost napájení z obou zdrojů a také jejich správné přepínání. Pro získání potřebných napěťových úrovní jsou na propojovací desce implementovány dva stejnosměrné DC-DC měniče napájené ze dvou adaptérů pro napájení notebooků s třídou ochrany II, tedy dvoukolíkovou vidlicí a plovoucím výstupem o napětí 12 V a proudu až 3 A.

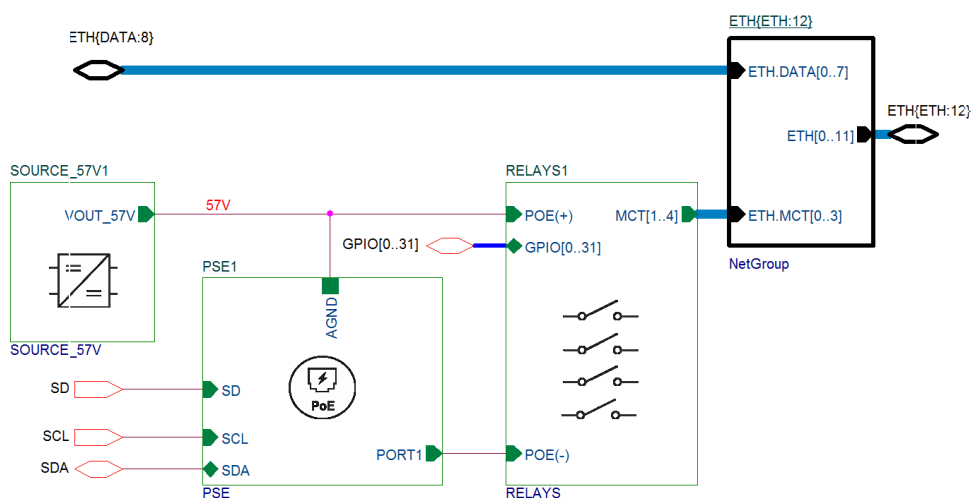
Výstupní napětí DC-DC převodníků na propojovací desce je v obou případech vyšší než vstupních 12 V a oba jsou realizovány s využitím obvodu LM3478 v konfiguraci step-up. Měnič pro PoE zdroj je nastaven na pevné výstupní napětí 57 V, měnič pro přídatný zdroj má regulovatelné výstupní napětí v rozmezí 15 až 30 V. Výstupy obou měničů jsou ke zbytku obvodu připojeny přes nulové odpory, které se osadí až po úspěšném oživení obou spínaných zdrojů.



Obr. 16: Schéma DC-DC převodníku pro PoE zdroj

3.3.2.1 Zdroj PoE

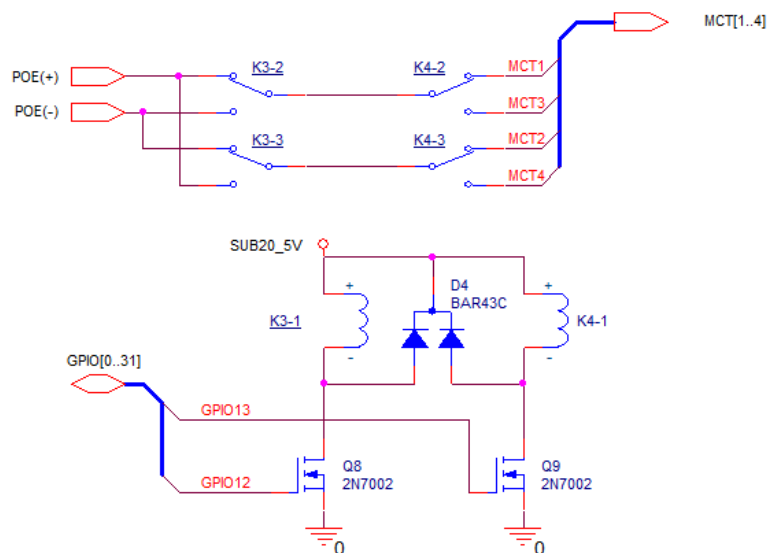
Mikrovlňný spoj RAY2 firmy RACOM se řadí ke standardu IEEE 802.3at-2009 neboli PoE+, výkon odebíraný ze zdroje může dosahovat až 30 W při napětí 50 - 57 V. K napájení jsou využity 2 páry ethernetového kabelu. Modem disponuje ethernetovým rozhraním standardu 1000BASE-T, kdy je k datovým přenosům využito všech osm vodičů ethernetového kabelu, dva ze čtyř párů tedy slouží jak k přenosu dat, tak k napájení. Na vstupu modemu jsou diodové usměrňovací můstky, které upravují polaritu vstupního stejnosměrného napětí a umožňují tak k napájení využít buď přímý, nebo křížený ethernetový kabel.



Obr. 17: Blokové schéma zdroje PoE a přepínacích relé

Na propojovací desce je realizován PoE zdroj s kontrolérem LTC4266, který vyžaduje napájecí napětí 55 - 57 V. Jedná se o aktivní PoE zdroj, při připojení zátěže tedy proběhne detekce a klasifikace napájeného zařízení (Powered Device - PD). Tím se předchází případnému poškození zařízení, která nepodporují PoE. Při detekci nastaví PoE zdroj své výstupní malé napětí mezi 2,7 V a 10,1 V. PD nastaví na svůj vstup detekční odpor o hodnotě 25 k Ω , čímž indikuje, že podporuje PoE. Pokud PSE naměří odlišnou hodnotu odporu, detekce selže a připojenému zařízení není umožněno odebírat z PSE žádný proud. Pokud však detekce proběhne v pořádku, přechází se ke klasifikaci, při níž PD nastavením příslušné zátěže indikuje, do jaké spadá výkonové třídy. Modem náleží do třídy PoE+, jejíž klasifikační odpor je 63 Ω , po úspěšně dokončené klasifikaci může z PSE odebírat až 30 W.

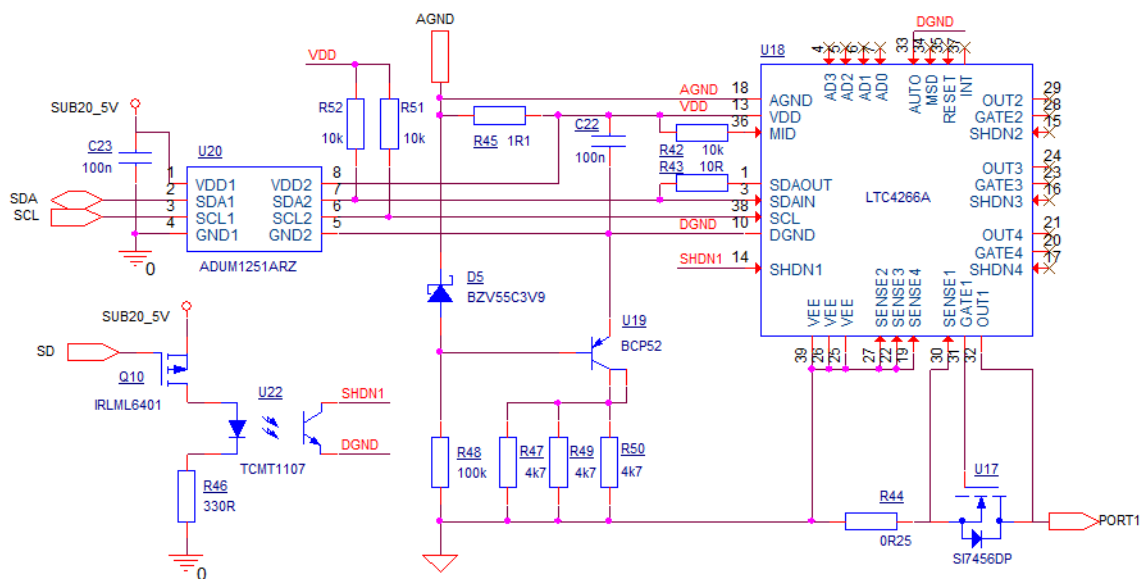
Obvod LTC4266 je zapojen v polo-automatickém módu, detekci a klasifikaci tak zajišťuje automaticky a jejich výsledky je možné vyčíst přes I²C sběrnici z interních registrů. Komunikaci s počítačem zajišťuje USB-I²C převodník SUB-20 od firmy DIMAX. K otestování funkčnosti napájení modemu při všech možných polaritách napájecího napětí (a tedy simulace napájení přímým a kříženým kabelem) slouží na propojovací desce soustava relé (na obrázku 18) spínaných digitálními IO piny převodníku SUB-20.



Obr. 18: Soustava relé pro přepínání polarity napájení (blok POE1/RELAYS1)

Signály POE(+) a POE(-) jsou připojeny k výstupním svorkám spínaného stejnosměrného 57V zdroje realizovaného v rámci propojovacího obvodu, zatímco signály MCT1, MCT2, MCT3 a MCT4 jsou prostřednictvím testovacích jehel přivedeny na ethernetový

konektor na modemu a slouží k napájení DUT. Přepínání napájecích polarit je realizováno pomocí dvou relé typu DPDT (Double Pole Double Throw). K ovládání čtyř přepínačů tak stačí pouze dva digitální výstupy převodníku SUB-20 a přitom je možné docílit všech čtyř možných kombinací napájecích polarit. K ochraně spínacích tranzistoru proti proudovým špičkám vytvořeným cívkou relé v okamžiku vypnutí slouží dvojitá dioda D4.



Obr. 19: Schéma zapojení PoE kontroléru (blok POE1/PSE1)

K napájení digitální části kontroléru LTC4266A je navržen lineární stabilizátor ze Zenerovy diody D5 a PNP tranzistoru U19, který na svém kolektoru udržuje konstantní napětí o 3,3 V nižší než na svorce AGND. Ze čtyř dostupných výstupních bran kontroléru je použita pouze jedna, většina nevyužitých vstupů může být ponechána plovoucích, uvnitř obvodu jsou pomocí pull-up a pull-down rezistorů nastaveny do výchozí logické úrovně. Spínání výstupního napětí a řízení analogové komunikace při detekci a klasifikaci PD je řízeno pomocí tranzistoru U17. Proudový odběr je měřen jako úbytek napětí na měřicím odporu R44. Rozhraní sběrnice I²C musí být galvanicky odděleno optoizolátorem U20. K rychlému vypnutí výstupní brány slouží signál SD (Shutdown), který je galvanicky oddělen optočlenem U22.

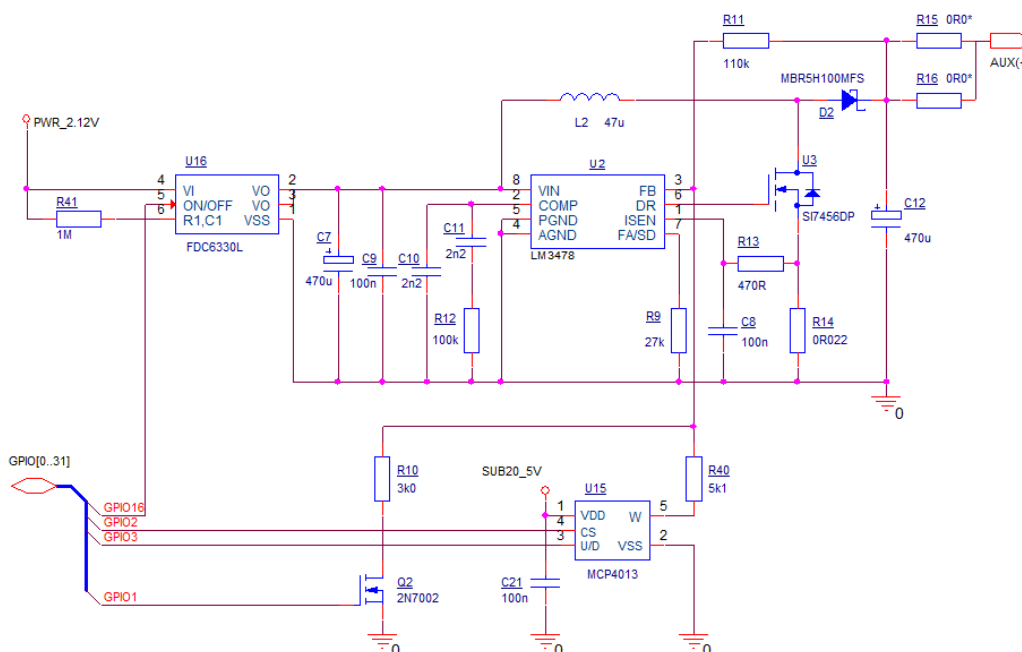
Zapnutí a vypnutí PoE zdroje je možné provádět zápisem hodnot do příslušných registrů obvodu LTC4266 přes I²C sběrnici. Při většině měření je DUT napájeno z PoE zdroje, jelikož ten na rozdíl od přídavného zdroje zajišťuje kontrolu nad odebíraným proudem,

v případě překročení maximálního povoleného odebraného výkonu automaticky odpojí modem od napájení.

3.3.2.2 Přídavný zdroj

K přepnutí na tento zdroj by mělo dojít, pokud hodnota jeho výstupního napětí přesáhne napětí PoE zdroje. Přídavný zdroj je na propojovací desce realizován DC-DC měničem s nastavitelným výstupním napětím změnou odporu ve zpětné vazbě za pomoci obvodu MCP4013. Jedná se o digitální odpor s nastavitelným v rozmezí 0 až 5 k Ω jednoduchým up-down protokolem obsluhovaným dvěma digitálními IO piny převodníku SUB-20.

DC-DC měnič realizující přídavný zdroj (na obrázku 20) může být připnutím odporu R10 do zpětné vazby nastaven do režimu pro testování přepětových ochran na napájecích vstupech modemu, kdy je jeho výstupní napětí 75 V. Zapínání a vypínání přídavného zdroje je prováděno spínačem zátěže FDC6330L.



Obr. 20: Schéma DC-DC převodníku pro přídavný zdroj

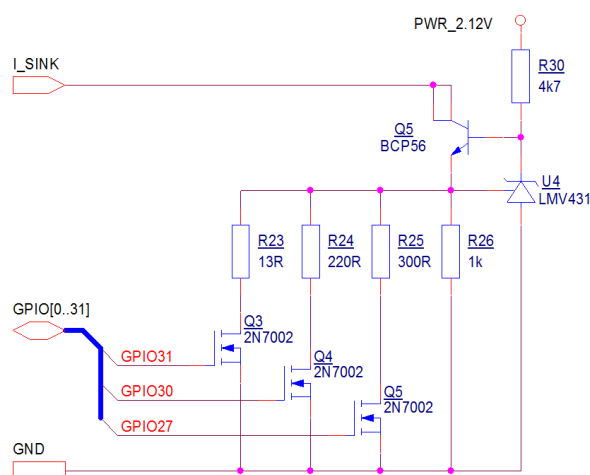
3.3.2.3 Zdroj konstantního proudu pro test transilů

Vstupní část modemu obsahuje soustavu přepětových ochran skládající se z několika bleskojistek a transilů. Transily jsou testovány zdrojem proudu skládajícím se z NPN tranzistoru, několika odporů a nastavitelného stabilizátoru LMV431. Proud zdroje je možné

přepínat připojováním odporů různých velikostí mezi řídicí elektrodu a anodu obvodu LMV431. Jeden z odporů takto připojen trvale, další tři je možné pomocí tranzistorů postupně paralelně připojovat k prvnímu odporu a regulovat tak výsledný odpor mezi řídicí elektrodou a anodou a tím měnit i hodnotu proudu zdroje.

Pokud transil na modemu chybí nebo je špatně připájený, naměřené napětí je vyšší než 75 V, naopak při zkratu způsobeném například tepelným poškozením transilu je na něm naměřeno napětí blízké nule.

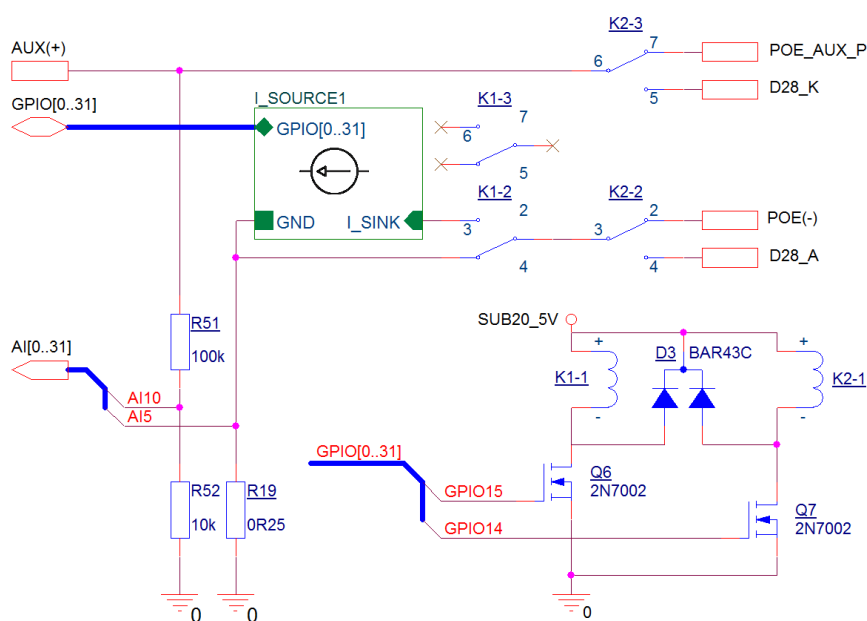
Na propojovací desce je realizován jeden zdroj konstantního proudu, kterým jsou postupně otestovány transily na obou napájecích vstupech modemu. Soustava relé na výstupu DC-DC měniče přidavného zdroje zajišťuje přepínání mezi režimy napětového a proudového zdroje, a následně také připojení proudového zdroje k jednomu nebo druhému testovanému transilu. Při odpojení proudového zdroje, tedy kolektoru tranzistoru Q5, protéká celý konstantní proud zdroje přes odpor R30, bázi tranzistoru a odpor R26.



Obr. 21: Schéma proudového zdroje (blok TRANSIL_TEST1/I_SOURCE1)

Před testem je nutné zajistit odpojení přílehlých částí modemu, aby převážná většina testovacího proudu protékala právě jen přes měřený transil. Konkrétně se jedná o zavření tranzistoru MOSFET uvnitř obvodu TPS2378, tvořícího vstupní rozhraní PD a také o deaktivaci step-down DC-DC měniče, konvertujícího napětí PoE zdroje na 5,25 V. Obě tyto operace jsou provedeny zkratováním příslušných pinů obvodů proti zemi za pomoci optočlenů, aby bylo zachováno galvanické oddělení zemního uzlu PoE zdroje od propojovacího obvodu.

Je nutné se ujistit, že testování transilů v žádném případě nemůže ohrozit funkčnost modemu ani poškodit žádnou ze součástek, to znamená, že napětí na transilu a tedy i na paralelně připojených součástkách nepřesáhne maximální hodnotu napětí uváděnou výrobcem v katalogovém listu. Jedná se konkrétně o obvody: PD rozhraní TPS2378, monitor výkonu LTC2945, DCDC měnič V36SE05010, diodové usměrňovací můstky CBRHDS2-100 a dále několik 100 V tranzistorů. Omezujícím obvodem je DC-DC měnič, jehož maximální přípustné transienční napětí je 100 V po dobu 100 ms a maximální kontinuální napětí činí 80 V. Při použití zdroje s maximálním výstupním napětím 75 V tedy nemůže dojít k ohrožení životnosti těchto obvodů.

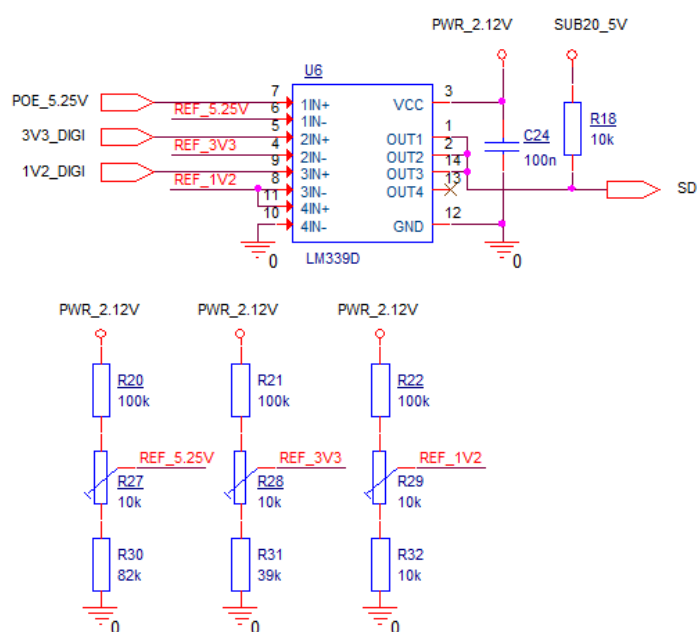


Obr. 22: Schéma obvodů pro test transilů

Pro přepínání jsou použita malá telekomunikační relé s maximálním spínaným stejnosměrným napětím 200 V a proudem 2 A. V průběhu ožívání propojovacího obvodu se ale ukázalo, že při přepnutí zdroje z režimu konstantního proudu do napěťového režimu je výstupní kondenzátor spínaného zdroje nabitý na 75 V schopný dodat přes testovaný transil špičkový proud dostatečný ke svaření kontaktů relé. Tato chyba musela být dodatečně upravena softwarově zavedením zpoždění mezi vypnutím spínaného zdroje a přepnutím relé. Docílí se tím vybití kapacity do obvodů modemu i do proudového zdroje a spínané napětí poklesne na úroveň, která nemůže životnost relé ohrozit.

3.3.3 Komparátory

Kontrola správné úrovně napájecích napětových hladin je na propojovací desce realizována rychlými komparátory integrovanými v obvodu LM339D [15]. Na vstupy jednotlivých komparátorů jsou přivedeny hlavní napájecí úrovně modemu (5,25 V, 1,2 V a 3,3 V) a jsou porovnány s příslušnou napětovou referencí vytvořenou odporovým děličem. Hodnota referencí je nastavitelná od jmenovité hodnoty napětí po úroveň přibližně o 1 V vyšší pomocí odporového trimru. Výstupy komparátorů jsou typu otevřený kolektor, mohou tak být spojeny do jednoho výstupu SD, který je prostřednictvím optočlenu připojen k vypínacímu vstupu zdroje PoE. Schéma zapojení je na obrázku 23.



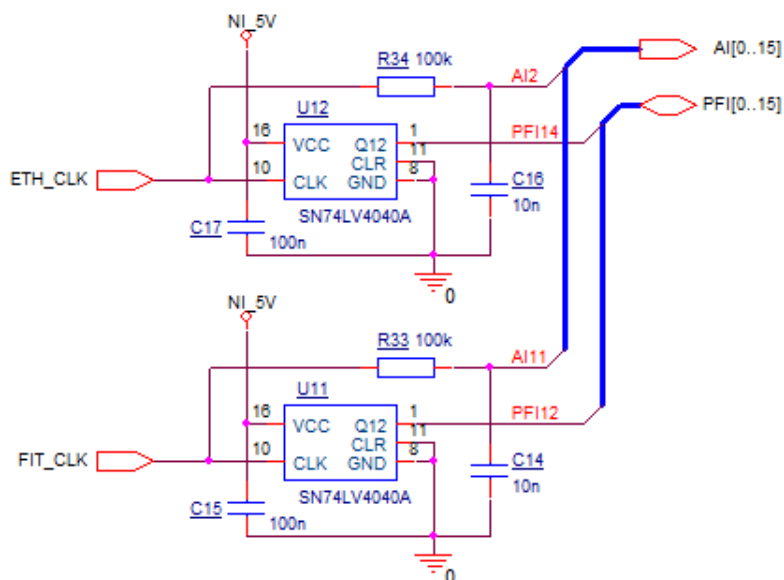
Obr. 23: Schéma zapojení komparátorů

3.3.4 Děličky taktovacích signálů

Měřicí karta NI-6353 obsahuje čtyři 32bitové čítače se 100MHz časovou základnou. V testeru jsou využity k ověření přesnosti frekvence hodinových signálů modemu FIT_CLK a ETH_CLK, které mají jmenovitý kmitočet 25 MHz. K dosažení co nejvyšší přesnosti měření jsou signály z modemu přeneseny koaxiálním kabelem do propojovacího obvodu, kde jsou před zpracováním měřicí kartou nejprve upraveny.

Jako dělička frekvence signálu slouží 14bitový asynchronní čítač SN74LV4040 [16]. Jedná se o 14 klopných obvodů typu T spřažených za sebe, signál na výstupu posledního

stupně má tak frekvenci 4096krát (2^{14}) menší, než je frekvence signálu na hodinovém vstupu obvodu. Takto upravený signál o frekvenci přibližně 6 kHz je již možné s vysokou přesností měřit interními čítači v měřící kartě.



Obr. 24: Zapojení čítačů pro dělení frekvence taktovacích signálů

Je rovněž potřeba ověřit, zda mají taktovací signály dostatečný rozkmit. Toto měření je realizováno pomocí jednoduchého RC filtru, na jehož vstup je přiveden neupravený měřený signál a jehož výstup (tedy střední hodnota signálu) je spojen s analogovým vstupem měřící karty. Vychází se z předpokladu, že měřený signál je obdélníkový periodický se střídou 1:1, jeho střední hodnota tak odpovídá polovině jeho amplitudy.

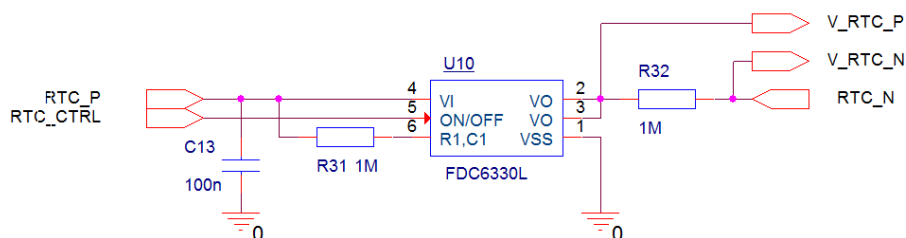
3.3.5 Obvod pro měření proudového odběru RTC

V modemu je vložena 3V knoflíková lithiová baterie, určená k napájení obvodu reálného času PCF8563 v případě odpojení zdrojů. Proud z baterie teče přes dvojitou diodu se společnou katodou, která zajišťuje, že pokud je připojen jeden z napájecích zdrojů, pak je obvod RTC (Real-Time Clock) napájen z lineárního stabilizátoru a baterie se nezatěžuje.

Odběr v klidovém stavu, kdy RTC pouze aktualizuje obsah svých registrů a nekomunikuje přes sběrnici I²C s procesorem, činí podle katalogového listu obvodu PCF8563 maximálně 500 nA [9]. Měření tohoto proudu probíhá přemostěním diody měřícím odporem, na němž je následně změřen úbytek napětí. Velikost odporu musí být dostatečně velká, aby byl

úbytek napětí při průchodu takto malého proudu měřitelný, zároveň ale nesmí úbytek napětí na odporu překročit propustný úbytek na diodě, aby většina proudu protékala přes měřicí odpor. Je zvolen měřicí odpor s hodnotou odporu $1\text{ M}\Omega$, na kterém při průchodu proudu 500 nA vznikne úbytek $0,5\text{ V}$.

Schéma obvodu je na obrázku 25. Připínání měřicího odporu paralelně k diodě je zajištěno integrovaným spínačem zátěže 6330L. Signál RTC_P je připojen k anodě diody, signál RTC_N k její katodě. Napěťový úbytek na odporu R32 je snímán prostřednictvím signálů V_RTC_P a V_RTC_N, připojených k analogovým vstupům měřicí karty. Spínač zátěže U10 je sepnut, pokud je signál RTC_CTRL v logické 1, v opačném případě pull-up rezistor R31 udržuje spínač U10 v rozepnutém stavu.

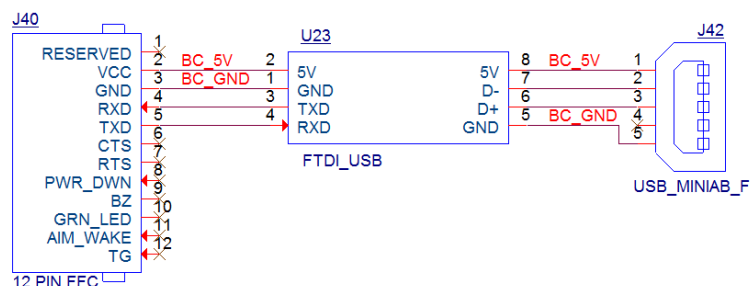


Obr. 25: Obvod pro měření proudového odběru RTC

3.3.6 Čtečka čárového kódu

K jednoznačné identifikaci testovaného modemu slouží štítek s 1D čárovým kódem nalepený na DPS. Součástí testeru je modul čtečky MCR-14 firmy Champtek [10] připevněný k vrchnímu laminátu. Průhledem v laminátu je při vložení desky modemu do fixtury naskenován čárový kód a výsledky testu tak mohou být přiřazeny ke konkrétnímu sériovému číslu výrobku. Pro zmenšení minimální čtecí vzdálenosti je před čočku čtečky připevněna lupa, která upravuje ohniskovou vzdálenost z 11 cm na 6 cm , umožňuje tak upevnění modulu blíže k desce laminátu, snižuje se tak celkový výškový profil testeru a zvyšuje se jeho mechanická odolnost.

Připojení čtečky k USB portu počítače je provedeno přes malou DPS s integrovaným obvodem firmy FTDI (Future Technology Devices International), který převádí signály na rozhraní UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) čtečky na USB signály. Zapojení je na obrázku 26.



Obr. 26: Připojení čtečky čárového kódu

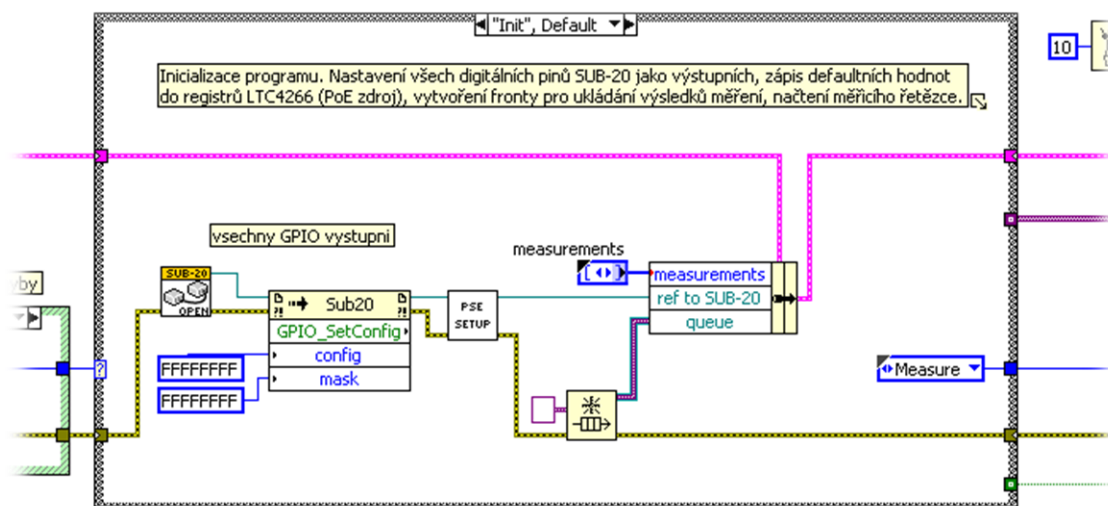
3.4 Deska plošných spojů

Deska je z laminátu FR4 se čtyřmi vrstvami a standardní skladbou. Vrchní i spodní vrstva slouží k vedení spojů a osazení součástek, vnitřní vrstvy jsou využity k rozvodu napájení a k zemnění. Rozložení DPS je koncipováno tak, aby konektory pro propojení s počítačem ležely na jedné straně desky a bylo možné je upevnit do panelu na zadní straně fixtury. Na protější straně desky je umístěn konektor pro připojení testovacích jehel. Spínané stejnosměrné zdroje jsou umístěny v oddělené části DPS, aby nedocházelo k rušení měřených analogových napětí a datových přenosů na ethernetovém rozhraní. K připevnění DPS do fixtury slouží několik přizemněných prokovených montážních děr.

3.5 Měřicí program

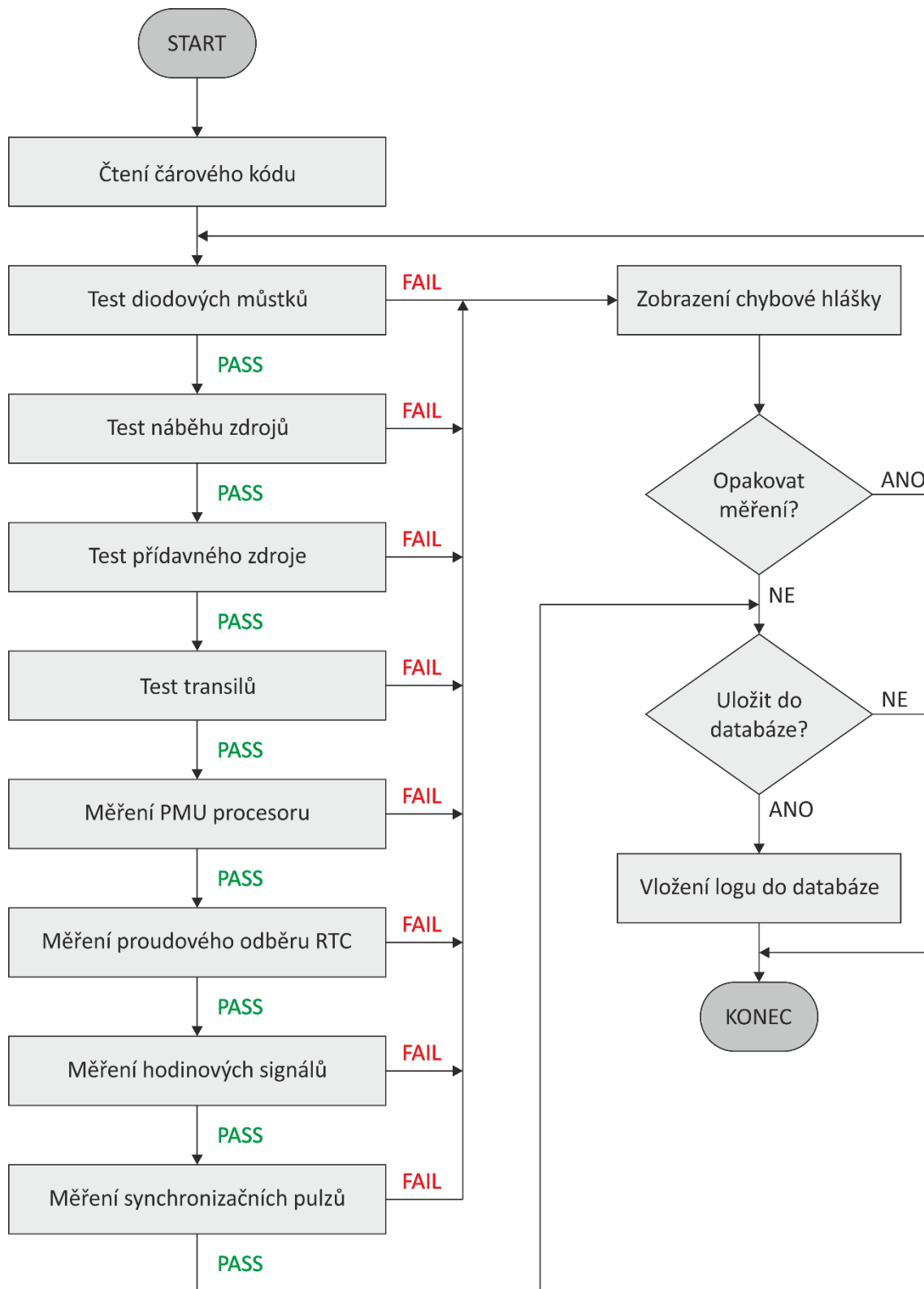
Software k obsluze měřicí karty NI-6353 a převodníku SUB-20 je vytvořen v grafickém programovacím jazyce LabVIEW. Jedná se o jazyk datových toků, příslušný podprogram se spustí vždy až ve chvíli, kdy jsou na všechny jeho vstupy přivedeny platné hodnoty reprezentované ve vývojovém prostředí barevnými signálovými vodiči. Barvy vodičů pak odkazují na konkrétní datový typ nebo takzvaný cluster, který slučuje několik proměnných do jednoho datového vodiče. LabVIEW umožňuje sdružit úkony jinak vyžadující několik obslužných aplikací do jednoho komplexního programu. Konkrétně se jedná o skenování čárového kódu čtečkou připojenou na virtuální COM port počítače, obsluhu měřicí karty a převodníku SUB-20, datové přenosy přes ethernetové rozhraní (testování spojení programem ping, připojení k modemu prostřednictvím protokolu SSH) nebo spuštění externí aplikace (využito při nahrávání firmware).

Pro ovládání měřicí karty je použit nativní ovladač NI-DAQmx (DAQ – data acquisition). Pomocí něj jsou vytvořeny podprogramy ke čtení dat z jednotlivých analogových vstupů a čítačů a pro čtení i zápis na vstupně výstupní digitální brány měřicí karty. K převodníku SUB-20 poskytuje výrobce balíček virtuálních instrumentů pro LabVIEW, z něhož jsou využity především funkce pro vytvoření reference na převodník, pomocí které je později ovládán, a dále funkce pro komunikaci po sběrnici I²C a obsluhu vstupně výstupních digitálních pinů.



Obr. 27: Hlavní smyčka programu, zobrazen je stav inicializace

Program je koncipován jako stavový automat. Při každé změně stavu je kontrolováno, zda nedošlo k chybě, poté následuje buď přechod do následujícího stavu anebo přerušení programu a vyhodnocení chyby. Zde záleží na typu chyby; pokud je fatální, dojde k ukončení programu a zobrazení kódu chyby a případných dodatečných informací. LabVIEW ale umožňuje i definování uživatelských chyb; ty jsou využity pro nesení informace o výsledcích měření, které indikují vadu vzniklou při výrobě testovaného modemu. V případě výskytu uživatelské chyby je se dočasně přeruší řetězec měřících podprogramů a dojde k uvědomění obsluhy testeru, která chybu vyhodnotí, případně měření zopakuje. V principu se jedná o test typu *pass-fail*, kdy je po každém měření vždy vyhodnoceno, zda jeho výsledek leží v zadaném intervalu a test tedy proběhl úspěšně (*pass*), nebo zda leží mimo něj (*fail*). Výsledek testu je pak uložen do SQL databáze k příslušnému záznamu podle sériového čísla modemu. Vývojový diagram programu je na obrázku 28.



Obr. 28: Vývojový diagram měřicího programu

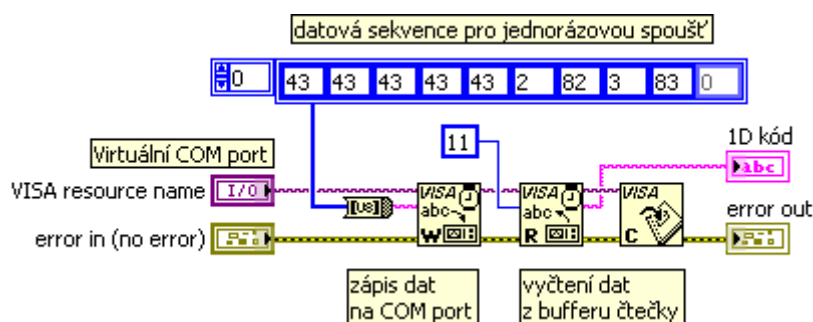
Při spuštění se přechází do stavu inicializace, kde jsou provedena základní nastavení připojených zařízení a kde je také vytvořen měřicí řetězec. Následně automat přechází do stavu měření, kde se postupně provádějí jednotlivé úkony z měřícího řetězce a jejich výsledky jsou vždy po dokončení měření zaznamenány ve formě datového typu variant k pozdějšímu zpracování. Variant je datový typ využívaný v LabVIEW k uložení téměř jakéhokoliv jiného datového typu, umožňuje tak sdružovat výsledky různého charakteru do jedné datové struktury.

3.5.1 Měřicí řetězec

Ve fázi inicializace programu se vytvoří posloupnost jednotlivých měřících úkonů, které se postupně automaticky provedou. Pořadí měření je vytvořeno s ohledem na logickou návaznost funkčních bloků modemu takovým způsobem, aby případná chyba byla zachycena co nejdříve a nemohla způsobit ohrožení správné činnosti ostatních funkčních bloků.

3.5.1.1 Čtení čárového kódu

Jednorozměrný čárový kód je přečten a uložen. Slouží k vyhledání záznamu o testovaném modemu v databázi, přiřazení protokolu z celého testu k sériovému číslu výrobku a jeho zápisu do databáze. K obsluze čtečky využít ovladač VISA (Virtual Instrument Software Architecture). V první fázi je na virtuální COM port zaslána datová sekvence z katalogového listu čtečky MCR-14 [10] ke spuštění jednorázového čtení čárového kódu.



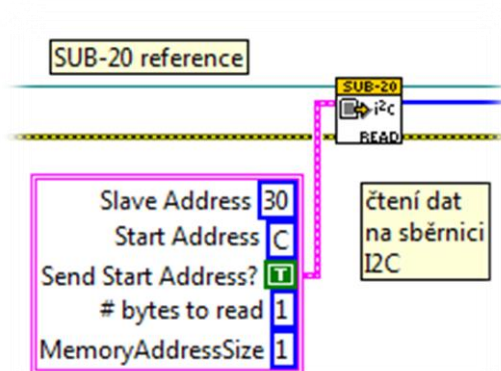
Obr. 29: Podprogram pro čtení čárového kódu

3.5.1.2 Test diodových můstků

Na napájecím vstupu ze zdroje PoE je na modemu osazena dvojice usměrňovacích diodových můstků, které upravují polaritu stejnosměrného napájecího napětí. Plní tak funkci

ochrany proti přepólování zdroje a rovněž umožňují použít k napájení modemu buď přímý, nebo křížený ethernetový kabel.

K testu je vytvořen cyklus, který pro každou ze čtyř možných napájecích variant vyčte pomocí převodníku SUB-20 přes sběrnici I²C z příslušných registrů kontroléru zdroje PoE, zda správně proběhla detekce napájeného zařízení a jeho klasifikace do patřičné výkonové třídy. Část programu obstarávající čtení dat na I²C sběrnici je na obrázku 30. Pokud jsou všechny diody v můstku v pořádku, výsledkem detekce je řetězec „Signature good“, bezchybně dokončená klasifikace je značena řetězcem „Class 4“. Následuje ještě výsledek druhé fáze klasifikace probíhající prostřednictvím protokolu LLDP (Link Layer Discovery Protocol).

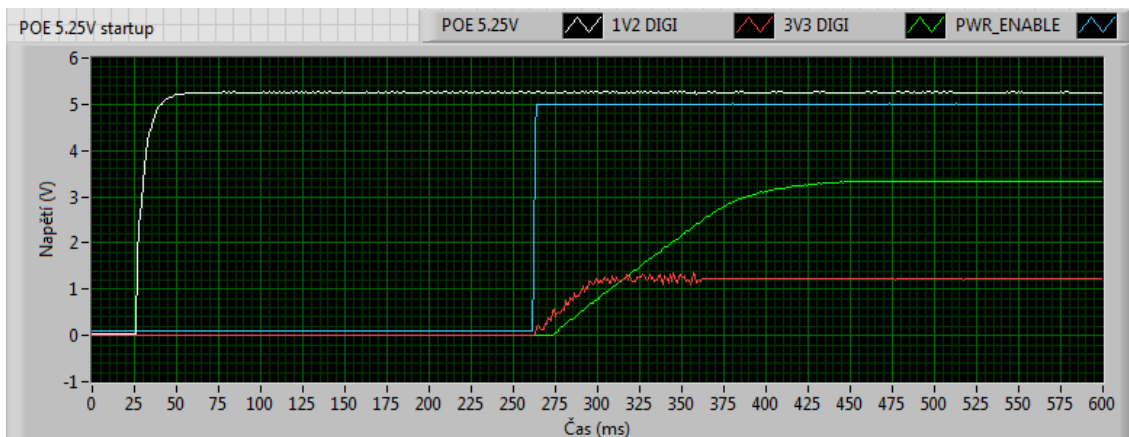


Obr. 30: Program pro vyčtení výsledku detekce a klasifikace

3.5.1.3 Test náběhu zdrojů

Na analogové vstupy měřící karty jsou přivedeny výstupy DC-DC měničů osazených na desce modemu, konkrétně se jedná o signály POE_5.25V, 3V3_DIG1 a 1V2_DIG1. Sleduje se zpoždění, se kterým nabíhají oba později zmiňované zdroje oproti signálu POE_5.25V a kontroluje se také rychlost náběhu výstupního napětí. Vzorkování analogově digitálního převodníku v měřící kartě je nastaveno na 1 kHz. Průběhy napětí jsou porovnány s maskami synchronizovanými na signál PWR_ENABLE, který aktivuje 3,3V a 1,2V měniče a slouží zároveň jako analogová spoušť měření. Při testu náběhu zdrojů je testovaný modem napájen z PoE zdroje, z kterého je průběžně přes I²C sběrnici vyčítán proudový odběr.

Všechny tři napěťové zdroje jsou zároveň hlídány rychlými komparátory, porovnávajícími jejich výstupní napětí s příslušnou referencí. Pokud napětí překročí definovanou úroveň, dojde k okamžitému odpojení testovaného modemu od napájení.



Obr. 31: Měření náběhu zdrojů

3.5.1.4 Test přídavného zdroje

Zdroj PoE je vypnut, zapnut je přídavný zdroj a měří se proudový odběr při napájecím napětí 20 V. Poté je napětí zdroje nastaveno na 15 V a plynule zvyšováno na 30 V. Měří se napětí, při kterém se zapne stejnosměrný step-down měnič na vstupu modemu s výstupním napětím 5,25 V. Poté je napětí přídavného zdroje plynule snižováno z 30 V zpět na 15 V a je zaznamenáno napětí, při kterém se měnič vypne.

3.5.1.5 Test transilů

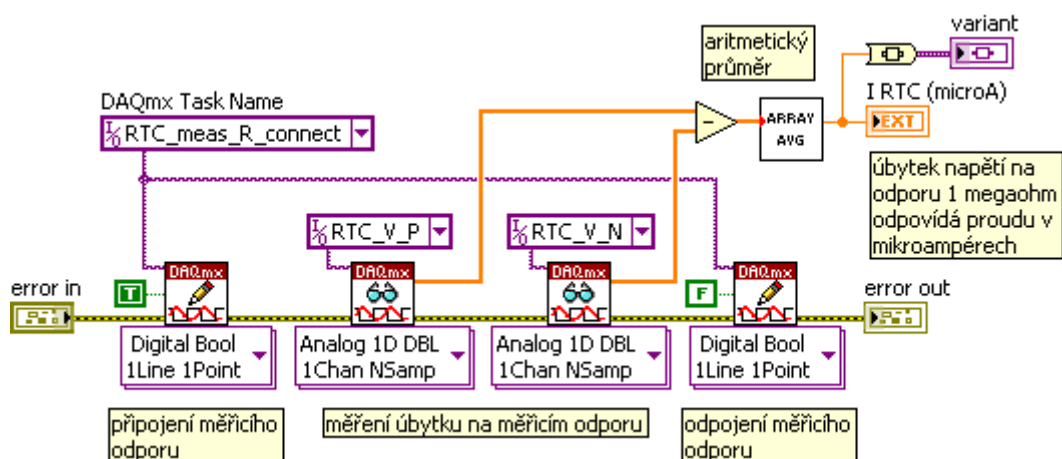
Testovacím stejnosměrným proudem jsou testovány dva transily, každý chrání jeden z napájecích vstupů modemu. Měřicí podprogram řídí zapnutí a konfiguraci zdroje konstantního proudu, přepíná jeho svorky mezi oběma měřenými transily a měří na nich úbytky napětí vzniklé průchodem testovacího proudu. Mezi těmito úkony jsou zavedena zpoždění nutná k vybití kapacit paralelně připojených k měřenému transilu, aby nedošlo ke zkreslení měření nebo k poškození součástek vlivem vybíjecích proudů.

3.5.1.6 Měření stejnosměrných napětí na procesoru

Procesor i.MX280 osazený na modemu obsahuje vlastní PMU (Power Management Unit), vytvářející z napájecího napětí 5 V pomocí DC-DC měniče s trojitým výstupem a systému LDO (Low Dropout Regulator) čtyři další hladiny pro napájení periférií. Všechna tato napětí jsou změřena v jednom kroku virtuálním instrumentem pro vícekanálové měření analogových napětí.

3.5.1.7 Měření proudového odběru RTC

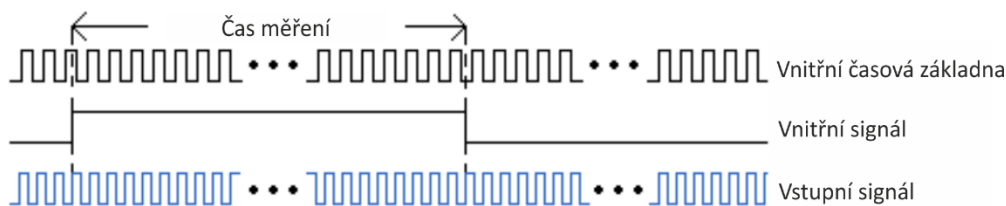
V první fázi programu proběhne zápis logické 1 na vstup spínače zátěže, čímž dojde k připojení měřicího odporu. Poté se změří analogové hodnoty stejnosměrného napětí na obou vývodech odporu a průměrná hodnota jejich rozdílu ve voltech odpovídá (při hodnotě měřicího odporu $1\text{ M}\Omega$) proudovému odběru obvodu RTC v mikroampérech. Nakonec je měřicí odpor opět odpojen a výsledek měření je převeden do datového typu variant. Podprogram je zobrazen na obrázku 32.



Obr. 32: Podprogram pro měření proudového odběru obvodu RTC

3.5.1.8 Měření hodinových signálů

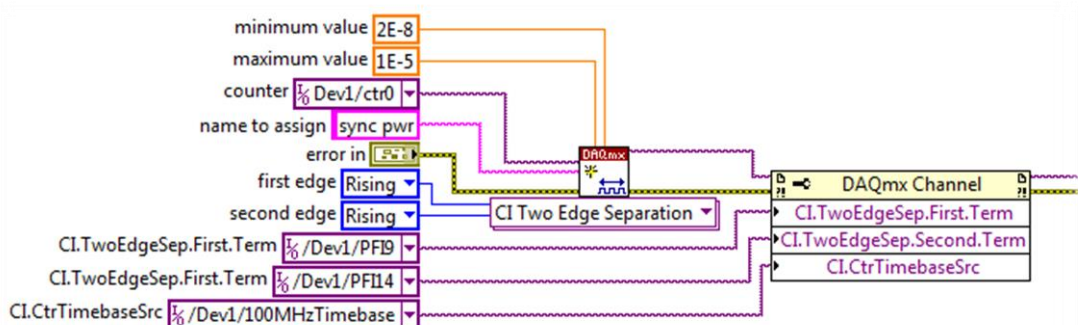
K měření přesnosti taktovacích signálů jsou využity dva čítače měřicí karty. Měřený signál s frekvencí 25 MHz je nejprve upraven děličkou frekvence v propojovacím obvodu, jeho kmitočet je zmenšen 4096krát a zároveň je obnoven jeho obdélníkový tvar. Takto upravený signál je přiveden na vstup prvního čítače, který po pevně určený čas měření čítá pulzy vstupního signálu. Při větším čase měření dochází k větší redukci kvantizační chyby, doba ale nesmí být příliš dlouhá, aby nedošlo k přetečení čítače. Je zvolen čas měření 300 ms, nastaven je pomocí druhého čítače na základě vnitřní časové základny o frekvenci 100 MHz. Logika měření je znázorněna na obrázku 33.



Obr. 33: Měření taktovacích signálů

3.5.1.9 Měření synchronizačních pulzů

Měření synchronizačních pulzů pro DC-DC převodníky z 5,25 V na 1,2 V a 3,3 V zajišťují přímo čítače na měřicí kartě. Je využit polymorfický virtuální instrument pro obsluhu čítačů v režimu měření odstupu dvou náběžných hran (viz obrázek 34). Každý ze signálů je přiveden na vstup nezávislého čítače a program změří časový rozdíl mezi náběžnou hranou prvního signálu a následující nejbližší náběžnou hranou druhého signálu. Nakonec je program spuštěn ještě jednou, tentokrát s měřením rozestupu mezi druhým a prvním signálem. Oba výsledky by měly být stejné (asi 800 ns) a jejich součet odpovídá periodě měřených signálů.



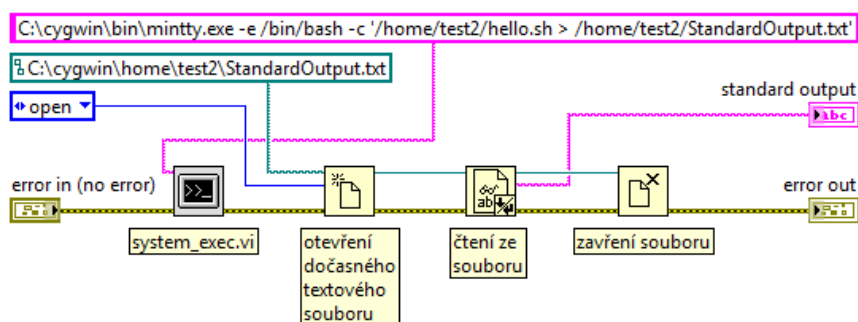
Obr. 34: Nastavení čítačů pro měření synchronizačních pulzů

3.6 Nahrání firmwaru

Do současné doby firma RACOM pro oživení a otestování základních funkcí modemu používala soubor vlastních Bash skriptů, celý proces tedy probíhal na počítačích s operačním systémem Linux. Zavedení LabVIEW vyžaduje tento postup změnit, jedná se totiž o software,

který nabízí plnou podporu (to znamená všechny moduly, ovladače a sady nástrojů) pouze pro Windows.

Jako nejjednodušší řešení se ukázalo využití kolekce softwarových nástrojů *Cygwin*, která poskytuje systému Windows podobnou funkcionalitu, jakou mají distribuce Linuxu. Tímto způsobem je možné využít většinu Bash skriptů bez nutnosti je přepisovat pro Windows. LabVIEW obsahuje nativní virtuální instrument *system_exec.vi*, který umí spustit externí aplikaci s příponou *exe* nebo *bat*. Pomocí něj je spuštěno CLI (Command Line Interface) nástroje *Cygwin* se jménem skriptu jako parametrem. Výstup skriptu je poté přesměrován do textového souboru, ze kterého může být načten zpět do LabVIEW a zobrazen nebo jinak zpracován. Příklad spuštění skriptu virtuálním instrumentem *system_exec.vi* je na obrázku 35.



Obr. 35: Spuštění Bash skriptu v LabVIEW

Nahrání firmware probíhá v několika fázích. Nejprve je modem přes rozhraní USB naboťován do servisního Linuxu pomocí nástroje *sb_loader* poskytnutého výrobcem procesoru i.MX280. Poté je do paměti flash nahrán samotný firmware s konfiguračními soubory. Firmware je uložen ve 128MB paměti typu flash, k jeho nahrání se používá flashovací rozhraní procesoru i.MX280. Nahrání programu do mikrokontroléru PIC, který funguje jako watchdog procesoru i.MX280, probíhá za pomoci programátoru a debuggeru PICkit s využitím hotového Bash skriptu.

Tato metoda umožňuje nahrát firmware, ale není vhodná ke spuštění složitějších skriptů, které využívají nástroje dostupné pouze pro Linux. Pro zajištění využitelnosti celého archivu skriptů by bylo nutné připojit k testeru ještě průmyslový počítač s operačním systémem Linux a skripty spouštět v něm. Ovládání tohoto počítače by bylo zajištěno z hlavního programu v LabVIEW prostřednictvím protokolu SSH. Tato varianta nebyla vyzkoušena, ale do budoucna slibuje vytvoření komplexního univerzálního systému, schopného využít kterýkoliv v minulosti vytvořených skriptů a jiných nástrojů.

4. Závěr

V teoretickém úvodu jsem popsal funkci testovaného modemu pro mikrovlnný spoj a porovnal metody testování elektronických zařízení. Shrnujeme výhody i nevýhody ICT a z nich vyplývající možnosti pro replikování a vylepšení stávajícího testovacího a oživovacího postupu firmy RACOM.

Dále jsem provedl teoretický návrh testeru a popsal funkcionalitu jeho hlavních hardwarových částí. V rámci ověření schopnosti jehel pro ICT přenášet rychlé signály jsem provedl měření jejich impedančních vlastností. Speciální pozornost jsem věnoval návrhu a realizaci propojovacího obvodu pro úpravu signálů a řízení testeru. Detailně jsem popsal jednotlivé bloky obvodu příslušející ke konkrétním měřícím úkonům a popsal jsem tvorbu příslušných podprogramů pro řízení testu a měření obvodových veličin.

Nakonec jsem uskutečnil měření vzorku osmi modemů. Výsledky jsou shrnuty v tabulce na obrázku 36, zelená čísla značí, že výsledek testu leží v povoleném rozsahu hodnot a výrobek prošel testem. Podle tohoto testovacího měření jsem také upravil toleranční pásma masek pro vyhodnocení náběhů napájecích zdrojů.

Sériové číslo	Povolný rozsah	10117626	9832613	10109626	9658533	9649533	10123626	10111626	10114626	
Test diodových můstků	-	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	
Náběh zdrojů	1.interval (ms)	250 - 300	265,75	273,43	296,26	261,83	258,20	276,63	291,29	272,52
	2.interval (ms)	20 - 30	16,57	14,45	18,48	17,67	15,93	15,39	14,87	13,81
	Maska	-	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Přídavný zdroj	Uon (V)	17 - 19	17,64	17,89	17,63	17,88	17,83	17,65	17,59	17,65
	Uoff (V)	17 - 19	17,75	17,71	17,58	17,44	17,51	17,69	17,54	17,77
	U (V)	20 - 21	20,36	20,36	20,36	20,36	20,34	20,36	20,35	20,36
	I (mA)	330 - 370	358,63	337,57	352,55	358,27	347,91	368,28	359,71	365,42
Proudový odběr RTC (uA)	0,2 - 0,5	0,33	0,33	0,33	0,31	0,33	0,33	0,33	0,33	
Processor DC-DC	U1v2 (V)	1,15 - 1,25	1,23	1,22	1,22	1,22	1,23	1,22	1,22	1,22
	U1v8 (V)	1,75 - 1,85	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,82	1,83
	U3v4 (V)	3,3 - 3,45	3,42	3,41	3,39	3,40	3,42	3,41	3,39	3,40
	U1v5 (V)	1,45 - 1,55	1,53	1,53	1,52	1,53	1,53	1,52	1,52	1,52
Hodinový signál ETH	f (MHz)	24,999 - 25,001	24,999	24,999	24,999	24,999	24,999	24,999	24,999	24,999
	Us (V)	1,75 - 1,85	1,80	1,80	1,79	1,80	1,81	1,81	1,81	1,81
Hodinový signál FIT	f (MHz)	24,999 - 25,001	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
	Us (V)	1,75 - 1,85	1,78	1,78	1,77	1,78	1,79	1,79	1,79	1,79
Rozestup synchr. pulzů (ns)	700 - 900	758,80	757,50	818,00	824,80	819,40	769,70	757,20	764,10	

Obr. 36: Tabulka výsledků měření

Největší nevýhodou ICT je nutnost zkonstruovat tester specificky pro konkrétní DPS. Při jakémkoliv přepracování návrhu elektronického zařízení může dojít k posunu měřicích bodů na DPS, čemuž je nutné přizpůsobit celý jehlový rastr. V případě malých úprav plošných spojů se jedná o navrtání nových děr do laminátu a přesunutí stávajících nebo přidání nových testovacích jehel. V případě úpravy testeru pro jiný výrobek může být nutné přizpůsobit nejen jehlové lože, ale i propojovací obvod. Podařilo se ale zajistit, aby výměna jehlových loží byla jednoduchá a rychlá aby fixtura a měřicí karta (tedy dvě nejdražší části testeru) byly využitelné i po přechodu na výrobu nového elektronického zařízení.

Při prvotních zkouškách testeru se ukázaly některé nedostatky, které by bylo vhodné v příští verzi odstranit. Největším vylepšením stávajícího testeru by byl návrh univerzálnějšího propojovacího obvodu, který je v současné době schopen provádět pouze testy popsané v zadání této práce. Může ale nastat situace, kdy ze statistik chybovosti součástek vyvstane požadavek na měření nové měření některé obvodové veličiny. Měřicí karta má využity všechny své analogové vstupy, ale pouze asi třetinu univerzálních digitálních pinů. Bylo by výhodné multiplexovat analogové vstupy a vyvést je společně se zbylými digitálními IO signály na konektor, na který bude možné později připojovat nové měřicí body.

Zjistil jsem také, že testovací jehly se chovají nejlépe při větším stlačení pružiny. Mají pak spolehlivější kontakt s menším přechodovým odporem. V další generaci testeru bych použil vyšší kotvící pouzdra jehliček, která zajišťují větší přitlak k měřicím bodům.

Pokud se ICT při oživování a testování ve výrobním procesu firmy RACOM osvědčí, bylo by výhodné při návrhu nových elektronických zařízení vytvářet na motivech plošného spoje testovací plošky pro zajištění bezproblémového kontaktování testovacími jehlami. Pokud navíc tyto testovací body budou umístěny pouze na jedné straně DPS, zlevní a zjednoduší se výroba jehlového lože, protože k ní bude potřeba jen jeden laminát a DPS bude k jehlám seshora přitlačována pouze nylonovými šrouby. Zároveň se zrychlí a zjednoduší přestavba testeru pro jinou DPS.

Požadavky zadání byly splněny a byl vytvořen vysoce automatizovaný tester, který zrychluje celý proces testování modemu pro mikrovlnný spoj a ukazuje potenciál ICT s návazností na testování dalších produktů firmy RACOM.

Zdroje

- [1] RACOM s.r.o. [online]. [cit. 2016-12-26]. Dostupné z: <http://www.racom.eu/cz/>
- [2] *Introduction to PoE 802.3af and 802.3at* [online]. 2009 [cit. 2017-01-05]. Dostupné z: https://www.ieee.li/pdf/viewgraphs/introduction_to_poe_802.3af_802.3at.pdf
- [3] BRESS, Thomas J. *Effective labview programming*. 2013. ISBN 1934891088.
- [4] *SUB-20 User Manual* [online]. [cit. 2017-01-07]. Dostupné z: <http://www.xdimax.com/sub20/doc/sub20-man.pdf>
- [5] Test Probes Catalog. Ingun, 2014.
- [6] *Automatic Optical Inspection* [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.miselectronics.com/PCB-AOI-Testing.html>
- [7] *Automatic X-ray Inspection* [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://en.dps-az.cz/articles/id:25164/in-process-x-ray-inspection-improves-quality-control-of-circuit-boards-and-cuts-costs>
- [8] *JTAG* [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <https://www.xjtag.com/about-jtag/what-is-jtag/>
- [9] *Katalogový list obvodu reálného času PCF8563* [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: http://www.nxp.com/documents/data_sheet/PCF8563.pdf
- [10] *Katalogový list čtečky čárových kódů MCR-14* [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: http://www.champtek.com/Upfile/product_pdf/20150511040201.pdf
- [11] *SCORPION FiS 640 In-Circuit Tester* [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://acculogic.com/products/in-circuit-testers/scorpion-fis-640-in-circuit-tester/>
- [12] *Flying probe tester SPEA 4080* [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.spea.com/BoardTest/ProductsbyFunction/4080/tabid/427/language/zh-CN/Default.aspx>

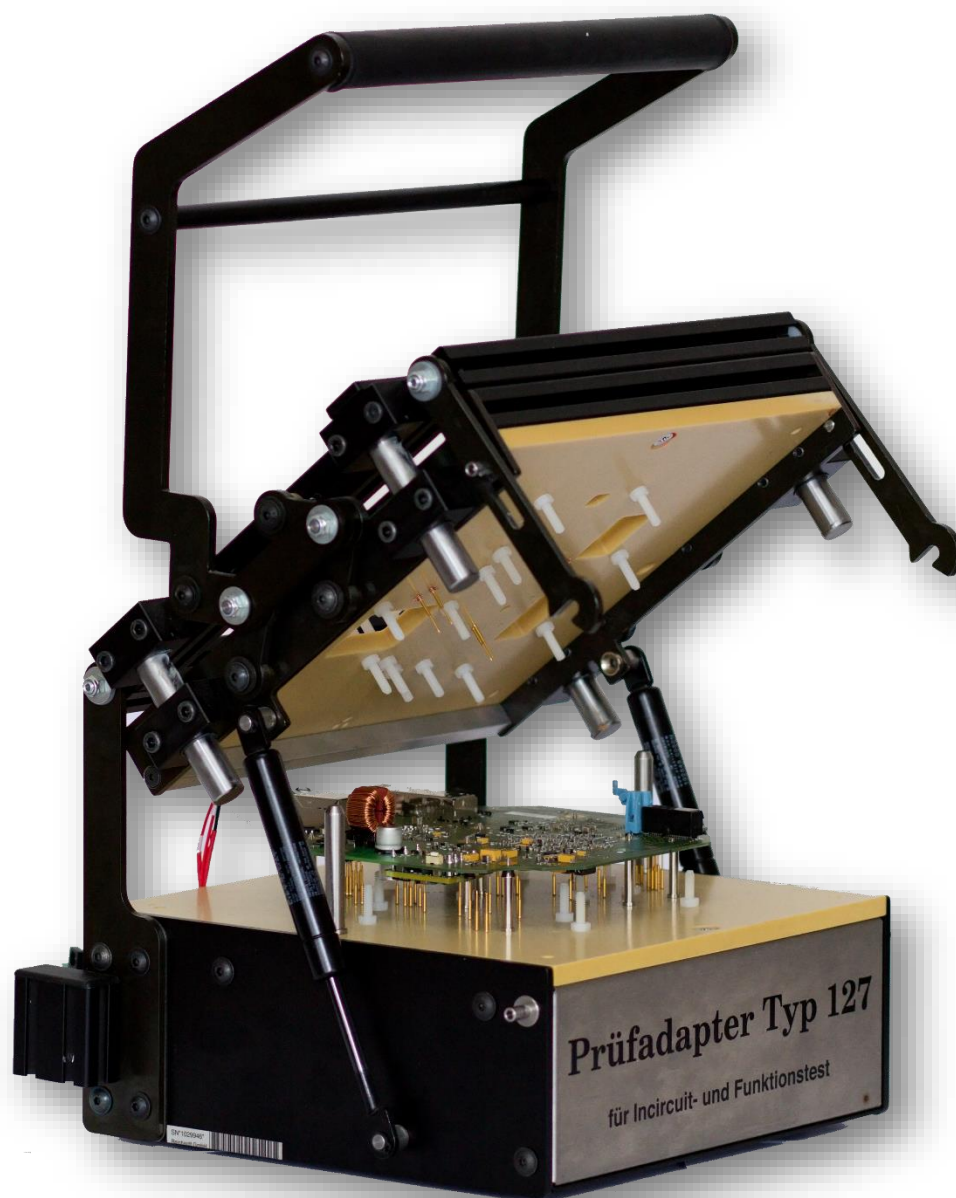
- [13] Eagle MTS180 In-Circuit Tester [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z:
<http://www.digitaltest.net/page,eagle-mts180-en-pcb-test-system-automated-test-equipement.htm>
- [14] Fixtura Typ 127 [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: https://www.reinhardt-testsystem.de/deutsch/adaption/pruefadapter/manueller_baugruppenadapter_typ_127.php
- [15] Katalogový list komparátoru LM339D [online]. [cit. 2017-01-09]. Dostupné z:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm239.pdf>
- [16] Katalogový list čítače LV4040 [online]. [cit. 2017-01-09]. Dostupné z:
<http://www.ti.com/product/SN74LV4040A>

Seznam obrázků

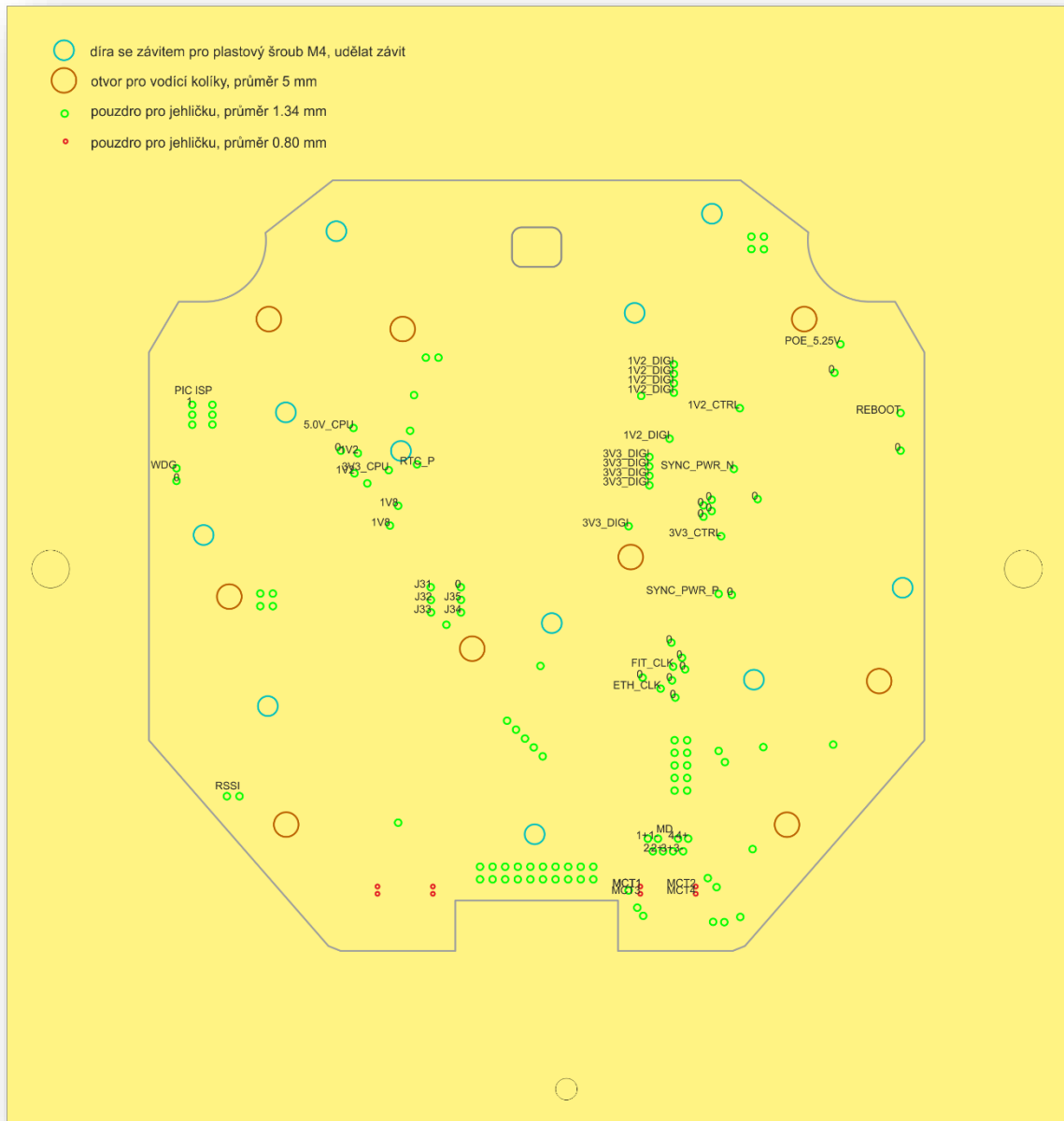
Obr. 1:	Mikrovlánný spoj RAY2.....	8
Obr. 2:	Typický výsledek AOI [6].....	9
Obr. 3:	Typický rentgenový snímek pouzdra BGA [7].....	10
Obr. 4:	InCircuit Scorpion FiS640 [11]	12
Obr. 5:	Eagle MTS 180 [13].....	13
Obr. 6:	Tester SPEA 4080 [12]	13
Obr. 7:	Fixtura Prüfadapter Typ 127 [14]	15
Obr. 8:	Měřicí karta NI PCIe-6353	15
Obr. 9:	Porovnání různých typů testovacích jehel [5]	16
Obr. 10:	Měřicí přípravek	17
Obr. 11:	Výsledek měření impedančních vlastností jehel	18
Obr. 12:	Blokové schéma propojovacího obvodu	19
Obr. 13:	Konektory měřicího obvodu (blok CONN1).....	20
Obr. 14:	Zapojení měřicí karty (blok NI6353_CONN1)	21
Obr. 15:	Zapojení převodníku SUB-20 (blok SUB20_SOCKET1).....	22
Obr. 16:	Schéma DC-DC převodníku pro PoE zdroj	23
Obr. 17:	Blokové schéma zdroje PoE a přepínacích relé.....	23
Obr. 18:	Soustava relé pro přepínání polarity napájení (blok POE1/RELAYS1).....	24
Obr. 19:	Schéma zapojení PoE kontroléru (blok POE1/PSE1)	25
Obr. 20:	Schéma DC-DC převodníku pro přídatný zdroj	26
Obr. 21:	Schéma proudového zdroje (blok TRANSIL_TEST1/I_SOURCE1)	27
Obr. 22:	Schéma obvodů pro test transilů	28
Obr. 23:	Schéma zapojení komparátorů	29
Obr. 24:	Zapojení čítačů pro dělení frekvence taktovacích signálů	30
Obr. 25:	Obvod pro měření proudového odběru RTC.....	31
Obr. 26:	Připojení čtečky čárového kódu	32
Obr. 27:	Hlavní smyčka programu, zobrazen je stav inicializace.....	33
Obr. 28:	Vývojový diagram měřicího programu	34
Obr. 29:	Podprogram pro čtení čárového kódu	35
Obr. 30:	Program pro vyčtení výsledku detekce a klasifikace	36
Obr. 31:	Měření náběhu zdrojů.....	37
Obr. 32:	Podprogram pro měření proudového odběru obvodu RTC.....	38
Obr. 33:	Měření taktovacích signálů	39

Obr. 34:	Nastavení čítačů pro měření synchronizačních pulzů	39
Obr. 35:	Spuštění Bash skriptu v LabVIEW	40
Obr. 36:	Tabulka výsledků měření.....	41
Obr. 37:	Fotografie finální verze testeru	47
Obr. 38:	Spodní laminát.....	48
Obr. 39:	Vrchní laminát	49
Obr. 40:	Motivy DPS ve vrstvě TOP (vlevo) a BOTTOM (vpravo)	50
Obr. 41:	Motivy DPS ve vrstvě VCC (vlevo) a GND (vpravo).....	51
Obr. 42:	Osazovací plán vrstev TOP (vlevo) a BOTTOM (vpravo).....	52

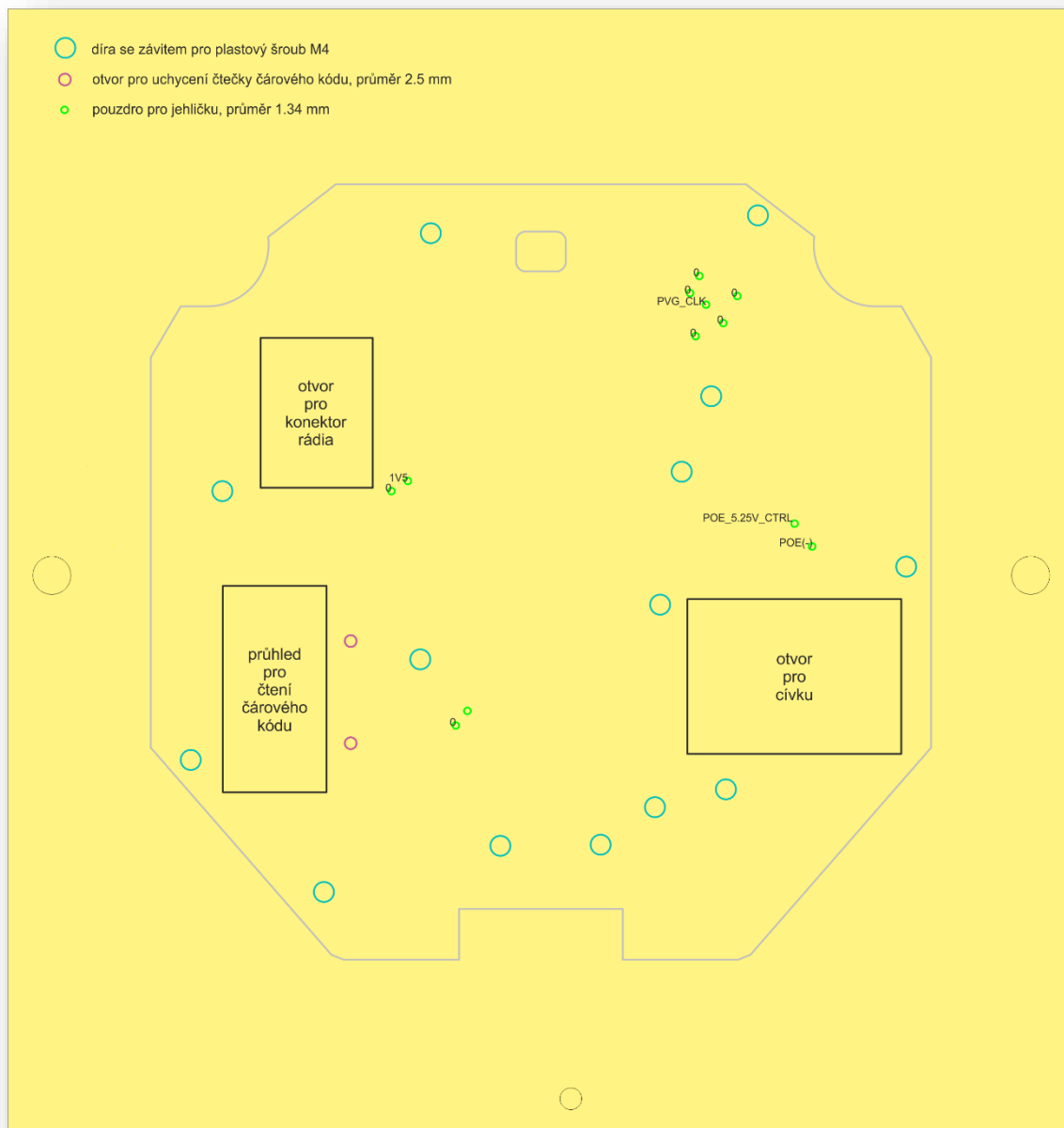
Přílohy



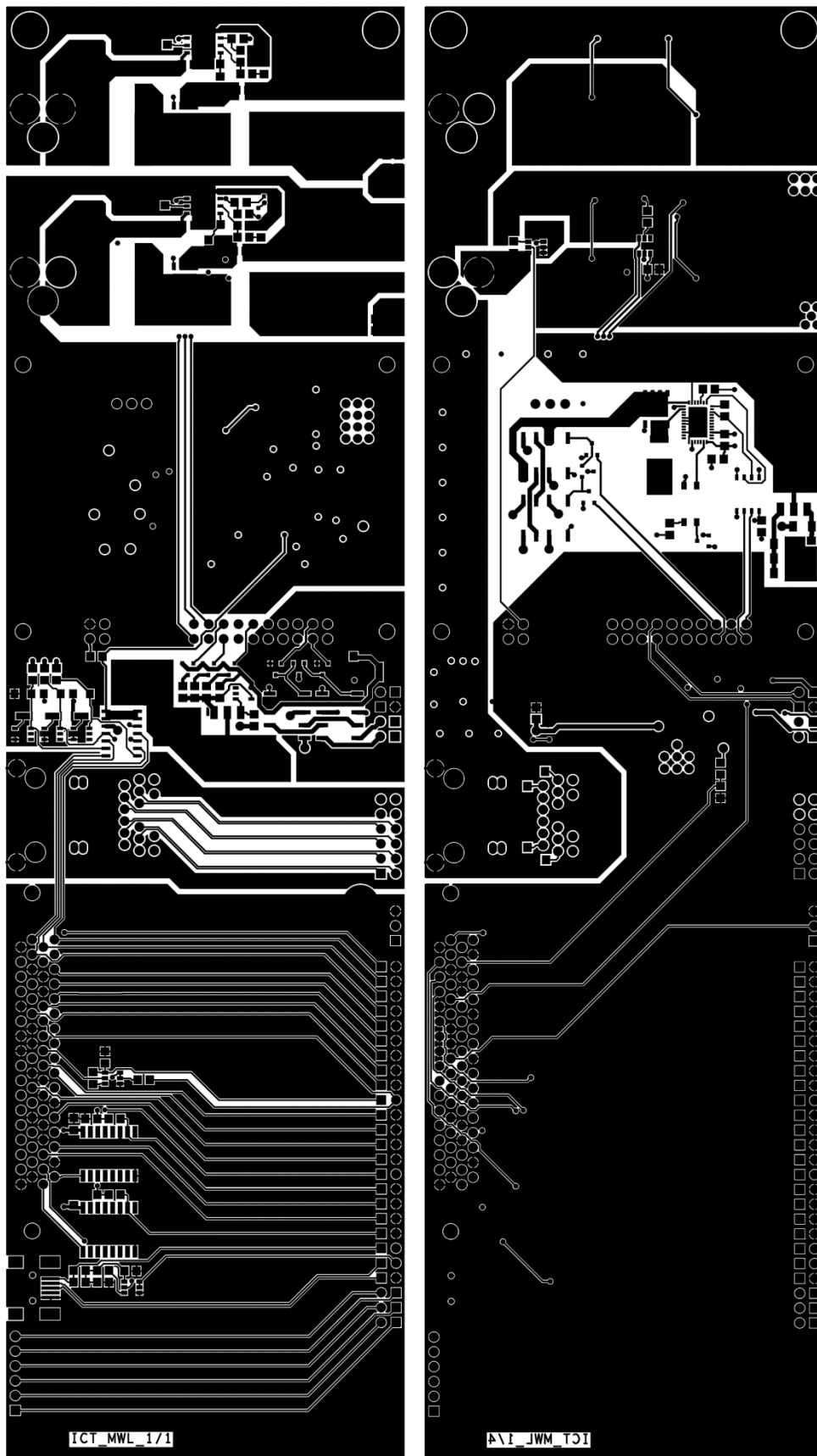
Obr. 37: Fotografie finální verze testeru



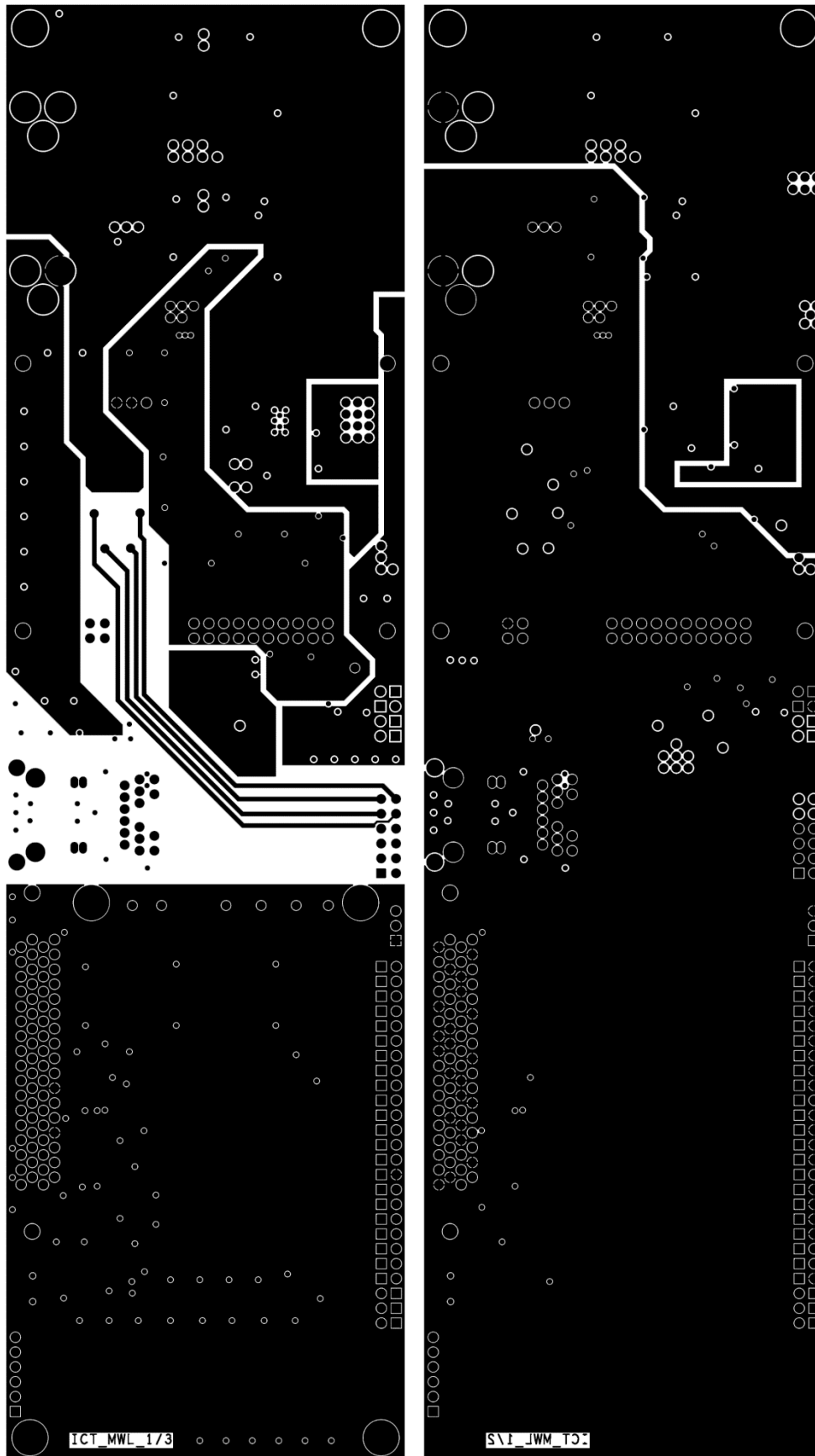
Obr. 38: Spodní laminát



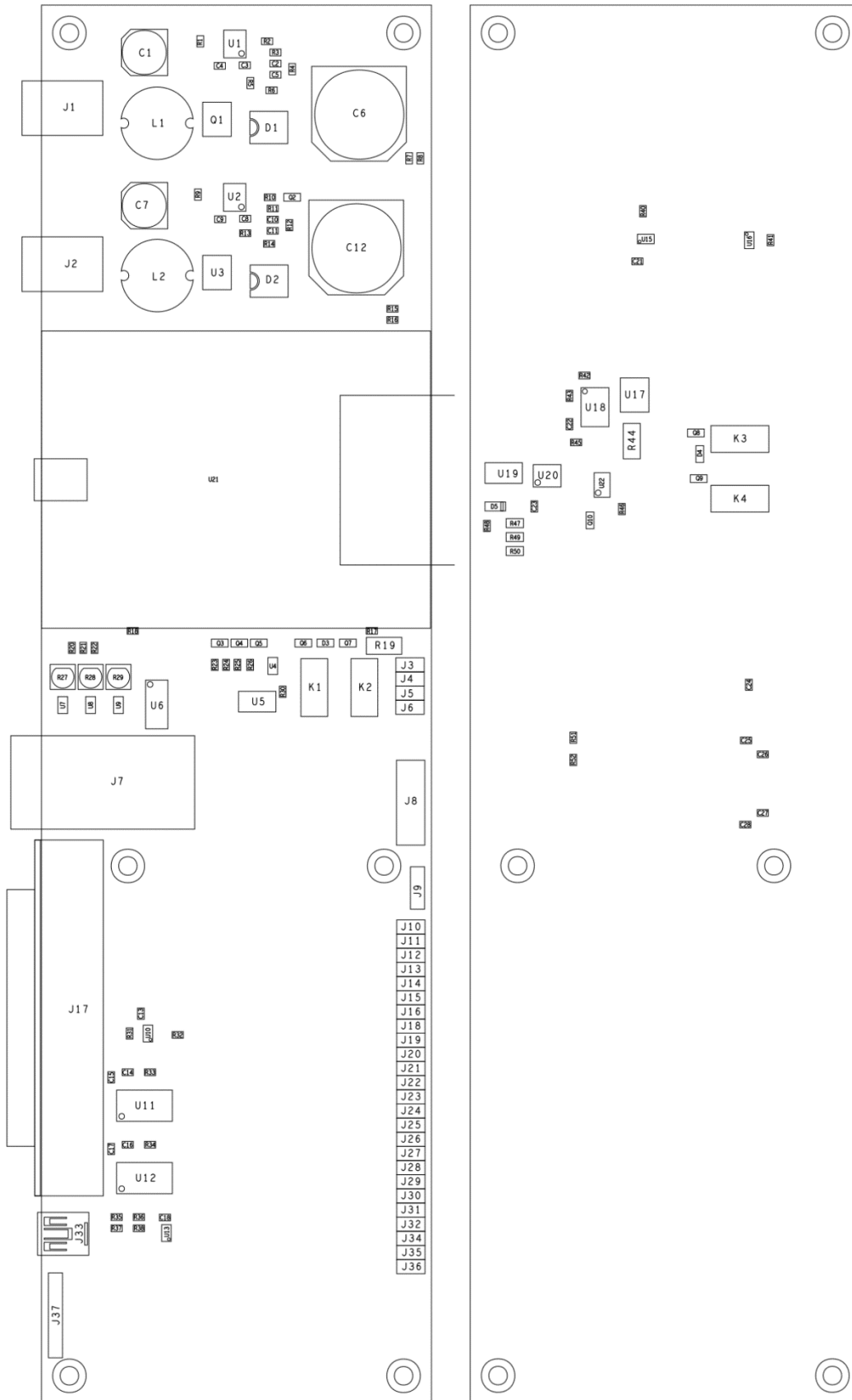
Obr. 39: Vrchní laminát



Obr. 40: Motivy DPS ve vrstvě TOP (vlevo) a BOTTOM (vpravo)



Obr. 41: Motivy DPS ve vrstvě VCC (vlevo) a GND (vpravo)



Obr. 42: Osazovací plán vrstev TOP (vlevo) a BOTTOM (vpravo)