

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra výkonové elektroniky a strojů

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
Způsoby galvanického oddělení signálů

Autor práce: **Radim Novotný**
Vedoucí práce: **Ing. Pavel Krýsl**
2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Radim NOVOTNÝ**
Osobní číslo: **E19B0153P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Téma práce: **Způsoby galvanického oddělení signálů**
Zadávající katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

Cílem práce je popsat způsoby a principy při galvanickém oddělování řídicích a měřicích signálů mezi nízkonapěťovou a vysokonapěťovou stranou výkonových měničů.

1. Popište principy pro galvanické oddělení signálů.
2. Porovnejte jednotlivé způsoby oddělení pro různé druhy signálů.
3. Proveďte experimentální měření.
4. Zhodnoťte změřené parametry.




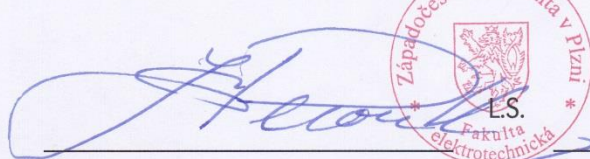
Rozsah bakalářské práce: **30 – 40**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

FROHN, Manfred et al. *Elektronika: polovodičové součástky a základní zapojení*. 1. české vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2006. 479 s. ISBN 80-7300-123-3.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Pavel Krýsl**
Research and Innovation Centre for Electrical
Engineering

Datum zadání bakalářské práce: **8. října 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2022**



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



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 8. října 2021

Abstrakt

Cílem práce je představit možnosti galvanického oddělování signálů ve výkonových měničích se zaměřením primárně na oddělovače využívané v měničích s tranzistory. V teoretické části jsou popsány jak obecně používané způsoby galvanicky odděleného přenosu informace, tak typická provedení reálných obvodů v návaznosti na výkonový obvod měniče, jsou popsány jejich charakteristické veličiny a konkrétní parametry, které jsou po oddělovačích požadovány. V praktické části je popsáno experimentální měření dopravního zpoždění a odolnosti vůči strmosti napětí mezi stranami oddělení (CMTI) provedené na několika oddělovačích využívajících různé způsoby přenosu informace a porovnání získaných hodnot s katalogovými údaji a teoretickými předpoklady.

Klíčová slova

Galvanické oddělení, CMTI, optočlen, digitální izolátor, izolační zesilovač, izolovaný A/D převodník, izolovaný budič

Abstract

This bachelor thesis tries to show wide range of technologies used for galvanic isolation of signals in power inverters, main focus is on inverters with transistors. In theoretical part are shown mechanism of isolation and practically used integrated circuits that come from needs in power circuit of inverter, their characteristics and typical parameters. Practical part consists of experimental measurement of propagation delay and common mode transient immunity and confrontation of measured values with datasheets and expectations based on theoretical part.

Key Words

Galvanic isolation, CMTI, optocoupler, digital isolator, isolated amplifier, ISO amp, isolated A/D converter, isolated gate driver

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce s použitím odborné literatury a dalších zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Dále prohlašuji, že veškerý software použitý při řešení bakalářské práce je legální.

Radim Novotný

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlu Krýslovi za cenné rady, připomínky a čas strávený konzultacemi a měřeními.

Obsah

1	Úvod	1
1.1	Pojmy	1
1.2	Galvanické oddělení obecně.....	3
1.2.1	Důvody pro využití galvanického oddělení	3
1.2.2	Základní požadavky pro výběr izolačního obvodu	3
1.2.3	Druhy přenosu přes potenciálovou bariéru	4
1.2.4	Samostatné oddělovače vs. integrovaná řešení	7
2	Přenos číslicových signálů	9
2.1	Základní vlastnosti	9
2.2	Přenos budicích signálů.....	9
2.2.1	Používané výkonové polovodiče	9
2.2.2	Požadavky na buzení používaných součástek	11
2.2.3	Izolační budiče a optické oddělení:.....	12
2.2.4	Porovnání jednotlivých způsobů oddělení budicích signálů.....	13
2.3	Digitální izolátor:	14
2.3.1	Kapacitní vazba:	15
2.3.2	Induktivní vazba:	15
2.3.3	Přenos dat optickým oddělením.....	16
3	Přenos analogových signálů	17
3.1	Základní vlastnosti	17
3.1.1	Měřené veličiny	17
3.2	Principy přenosu signálu	18
3.3	Izolované zesilovače (isolation amplifiers, ISO amp):	18
3.4	Izolované A/D převodníky:.....	19
4	Měření.....	21
4.1	Metodika.....	21
4.2	Měřené oddělovače	21
4.2.1	H11L1V – optická vazba	21
4.2.2	ADuM1301A – induktivní vazba	22

4.2.3	ISO1540DR – kapacitní vazba	22
4.2.4	ISO7721 – kapacitní vazba	22
4.3	Měřicí obvod – schéma	23
4.3.1	Generátor náběžné hrany	23
4.3.2	Generátor sestupné hrany.....	24
4.3.3	Zapojení měřených oddělovačů	25
4.3.4	Pomocné obvody.....	25
4.4	Měřicí obvod – plošný spoj.....	27
4.4.1	Návrh plošného spoje.....	27
4.4.2	Výroba plošného spoje.....	28
4.5	Předpokládané výsledky měření.....	28
4.6	Měření dopravního zpoždění.....	28
4.6.1	Optické oddělení – H11L1V	28
4.6.2	Induktivní oddělení – ADuM1301	29
4.6.3	Kapacitní oddělení – ISO1540DR	30
4.6.4	Kapacitní oddělení – ISO7721	31
4.6.5	Zhodnocení měření dopravního zpoždění.....	32
4.7	Měření CMTI	32
4.7.1	Optické oddělení – H11L1V	33
4.7.2	Induktivní oddělení – ADuM1301	36
4.7.3	Kapacitní oddělení – ISO1540DR	39
4.7.4	Kapacitní oddělení – ISO7721	42
4.7.5	Zhodnocení měření CMTI	45
	Zhodnocení a závěr.....	46
	Literatura.....	47
	Zdroje obrázků.....	49
	Přílohy.....	50

Seznam symbolů a zkratek

Značka	Popisek	Jednotka
R_G	Přídavný odpor předřazený elektrodě G tranzistoru	Ω
U_{XY}	Napětí mezi elektrodami X a Y tranzistoru	V
U_{DC}	Ustálené napětí hrany	V
U_{30}	Nabíjecí napětí indukčnosti	V
T_{ON}	Doba sepnutí tranzistoru generátoru hrany	s
ΔU	Odečtený rozdíl napětí	V
Δt	Odečtený čas, za který došlo k ΔU	s

Zkratka Vysvětlení

<i>ADI</i>	Analog devices Inc.
<i>ASK</i>	Amplitude Shift Keying – amplitudové klíčování
<i>A/D</i>	Analogově/Digitální
<i>C</i>	Kolektor – elektroda bipolárního tranzistoru
<i>CMR</i>	Common Mode Rejection – potlačení souhlasného rušení
<i>CMTI</i>	Common Mode Transient Immunity
<i>D</i>	Drain – elektroda unipolárního tranzistoru (funkční obdoba C)
<i>D/A</i>	Digitálně/Analogový
<i>E</i>	Emitter – elektroda bipolárního tranzistoru
<i>ef</i>	Efektivní hodnota (RMS)
<i>G</i>	Gate – řídicí elektroda unipolárního tranzistoru
<i>H</i>	High – vysoká logická úroveň (1)
<i>L</i>	Low – nízká logická úroveň (0)
<i>LED</i>	Light Emitting Diode – svítivá dioda
<i>OOK</i>	On – Off keying – amplitudové klíčování s jednou nulovou úrovní
<i>PWM</i>	Pulse width modulation – pulsně šířková modulace
<i>šp</i>	Špičková hodnota (peak, pk)
<i>S</i>	Source – elektroda unipolárního tranzistoru (funkční obdoba E)
<i>TI</i>	Texas Instruments
<i>UVLO</i>	Undervoltage lockout – vypnutí při nízkém napájecím napětí

1 Úvod

Výkonová elektronika je dnes rozšířena téměř do všech oblastí techniky. Mezi základní oblasti řešené právě pomocí výkonové elektroniky patří zdroje a měniče, které obsahují několik napěťových úrovní, vždy alespoň úroveň řízení a úroveň ve výkonovém obvodu – v naprosté většině aplikací je žádoucí, aby byly napěťové úrovně striktně odděleny, k čemuž slouží právě galvanické oddělovače. Vzhledem k extrémní šíři používaných měničů je tato práce zaměřena primárně na oddělovače používané s měniči s tranzistory v půlmůstkové struktuře – střídače, pulzní měniče, aktivní usměrňovače apod., které tvoří v současnosti asi většinu řízených výkonových měničů.

1.1 Pojmy

Galvanické oddělení

Dvě části obvodu jsou galvanicky spojeny, pokud jsou propojeny elektricky – vodiči, součástkami – mezi libovolnou dvojicí uzlů z jedné a druhé části obvodu existuje jednoznačný rozdíl potenciálů. Galvanicky oddělené části obvodu jsou propojeny pomocí vazby jiným typem energie než elektrické – mezi dvojicí uzlů z jedné a druhé části obvodu není definované napětí. V realitě existují i mezi jinou energií vázanými obvody parazitní parametry – i oddělené obvody se tedy ovlivňují, v praxi se proto uvažuje jako obvod bez galvanické izolace takový, ve kterém mohou téct stejnosměrné a střídavé proudy mezi částmi obvodu jen podle rozdílu potenciálu a galvanicky oddělené takové, kde jsou nežádoucí proudy co nejvíce potlačeny a prochází ideálně jen požadované signály a případně mezi nimi probíhá požadovaný transfer energie.

Výkonový měnič

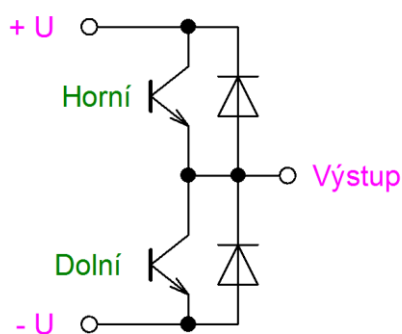
Výkonový měnič je elektrické zapojení využívající výkonové polovodičové prvky ke změně parametrů výstupní elektrické energie vzhledem ke vstupní – typ napětí (stejnosměrné/střídavé), velikost napětí a proudů a podobně. Měnič má ve většině případů stranu výkonovou (= silovou, vysokého napětí) – přímo spojenou s obvodem procházející energie – obsahující výkonové polovodiče, senzory pro měření procházejících proudů, napětí, teplot případně dalších parametrů a stranu řídicí (= nízkonapěťovou), odkud jsou výkonové polovodiče spínány, na kterou jsou přenášeny změřené hodnoty a odkud je celý měnič řízen.

Potenciálová bariéra

Linie vedoucí mezi stranou výkonovou a řídicí – přes potenciálovou bariéru potřebujeme přenášet řídicí a měřicí signály, ale naopak tok energie z výkonové strany je silně nežádoucí, neboť je vzhledem k energetickým úrovním výkonové strany pro řídicí nebezpečný a rušivý. Elektrické parametry provedení potenciálové bariéry jsou obvykle pro daný typ a použití měniče určeny normou.

Půlmůstek, mrtvý čas

Nejčastěji využívaná část zapojení výkonových tranzistorů využívaná ve velkém množství měničů (kombinace snižujícího a zvyšujícího pulzního měniče, střídače, pulzní usměrňovače). Dva tranzistory v sérii, „horní“ připojen k napájecímu napětí, „dolní“ k zemi výkonového obvodu a jejich střed je výstup. Emitor/source horního tranzistoru (tedy výstup půlmůstku) má proměnlivý potenciál vzhledem k zemi výkonového obvodu podle spínání tranzistorů – nutno řešit při návrhu buzení, neboť tranzistory se budí napětím mezi G a právě E/S. Mrtvý čas je uměle přidaný čas u měničů napěťového typu (obvykle jde o všechny využívající tranzistory zapojené právě jako půlmůstek), kdy jsou oba tranzistory blokovány. Při přechodu mezi vypnutím jednoho a zapnutím druhého je riziko, že by mohly vést oba najednou, což by vedlo ke zkratu napájecího zdroje výkonové části, což vzhledem k obvyklému zkratovému výkonu vede minimálně k destrukci výkonových tranzistorů.



Obr. 1: Půlmůstek

Fail-Safe

Při návrhu je promyšleno „bezpečné selhání“ – obvody nebo zařízení jsou navrženy tak, aby se při poruše ustálily v nejméně nebezpečném stavu.

Provedení izolace

Normy obvykle rozlišují několik úrovní izolace: funkční, základní, dvojitou, zesílenou a případně další druhy charakterizované minimálními vzdálenostmi a počty poruch se zachováním Fail-Safe stavu před vznikem nebezpečného stavu. Provedení izolace je definováno normami (IEC 60664, EN 50178 apod.) a je jedním z důležitých parametrů určujících výsledné provedení galvanického oddělovače. [1]

1.2 Galvanické oddělení obecně

1.2.1 Důvody pro využití galvanického oddělení

Ochrana zdraví osob, ochrana obvodů řídicí strany – řídicí strana pracuje s malými napětími, předává informace a přijímá pokyny pro měnič, ať jako data od jiného zařízení, nebo od lidské obsluhy. Výkonová část pracuje obvykle s napětími nebezpečnými lidskému životu i řídicí elektronice, proto je nezbytné zajistit galvanické oddělení mezi výkonovou a řídicí stranou

Eliminace zemních smyček, zvýšení odolnosti rušení – Pokud jsou dvě zařízení mezi kterými přenášíme signál galvanicky propojena – logické úrovně signálu jsou vztaženy ke stejnému potenciálu – zemi a zároveň jsou země propojeny i jinou cestou tak, že tvoří smyčku (typicky napájecí síť), mohou proudy (například naindukované rušení) procházející společnou zemí zkreslovat napětí a buď přímo způsobovat chyby, nebo častěji snižovat odolnost krátkodobým přechodovým stavům, případně šum u analogového přenosu. [2]

Zjednodušení budicích obvodů (posunem potenciálu) – při některých zapojeních výkonové strany jsou polovodiče na různých potenciálech (tranzistory půlmůstku, tyristory řízeného usměrňovače a další) – bylo by nutné přivádět budicí napětí vztažená k různé pracovní hladině tranzistoru. Při galvanickém oddělení se výkonová strana oddělovače může pohybovat na (teoreticky) libovolném potenciálu vzhledem k řídicí, kde mohou být v budicích obvodech potenciály oddělovačů propojeny od několika výkonových prvků u kterých by to nebylo možné přímo.

1.2.2 Základní požadavky pro výběr izolačního obvodu

Typ signálu – analogový nebo číslicový

Typ měniče – použité výkonové polovodiče ovlivňují nutnou rychlost a typ budících signálů. Podle typu řízení se mění i veličiny, které je nutno měřit, přičemž měřicí metody mají rovněž různé výstupní signály vyžadující různé oddělení.

Izolační pevnost – určí rozměry a provedení oddělovače. Izolační pevnost je dána materiálem izolace a provedením pouzdra. Pro trvalé pracovní napětí rozhoduje povrchová vzdálenost po pouzdře (creepage) – při provozu vzniká na povrchu pouzdra vrstva znečištění, která při překročení určité meze poskytne proudu cestu s relativně malým odporem – vzniknou plazivé proudy. Při špičce napětí (např. při přechodových jevech) může dojít k selhání i přeskokem nebo průrazem. Pro přeskok je určující vzdušná vzdálenost mezi vývody (clearance) a pro průraz síla izolačního materiálu. [1]

CMTI (kV/ μ s) – **Common Mode Transient Immunity** – maximální velikost strmosti napětí mezi stranami oddělení, která ještě nezpůsobí změnu stavu výstupu, tedy chybu. CMTI omezuje maximální spínací rychlost měniče při daném napětí výkonové strany.

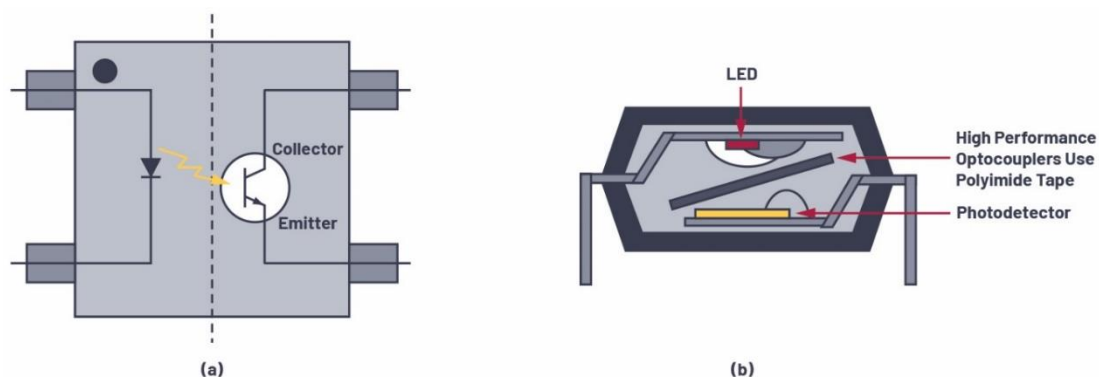
Požadavky pro zabudování – velikost, hmotnost, spotřeba...

Další požadavky – elektrotechnické normy, cena...

1.2.3 Druhy přenosu přes potenciálovou bariéru

Opticky – galvanické oddělení je zajištěno přenosem informace ve formě světla světlovodem z elektrického izolantu. Pro použití v integrovaných obvodech jsou častými materiály izolace silikon s polyimidovou fólií nebo epoxidová pryskyřice. Dalším možným provedením optického oddělení jsou mechanicky jiným způsobem řešené oddělovače, kdy je využit vzduch nebo naopak optické vlákno ze skla nebo plastu. Elektrická pevnost používaných izolantů je zhruba v rozsahu 1-100 V/ μ m, nejčastěji cca 50 V/ μ m. Optické oddělení používá nejméně elektricky pevné izolanty, ale zároveň jde (kromě samostatných transformátorů) o nejrozměrnější oddělovače, kde je možné při jejich konstrukci využít největší tloušťku izolace a lze tedy dosahovat největších celkových izolačních pevností, což je dovedeno do extrému při oddělení pomocí optického vlákna, kde je izolační pevnost téměř neomezená. Klasické optické oddělovače mají relativně velkou spotřebu, malou přenosovou rychlost (max. cca 1Mb/s) danou omezenou rychlostí spínání LED, omezenou životností danou stárnutím LED, ale naopak vysokou odolnost elektromagnetickému rušení. Jde o jediný princip oddělení, kdy lze přímo přenést i stejnosměrnou složku. Vzhledem k přímo vyvedené LED a obvykle i prvku přijímací strany je další výhodou možnost nastavení pracovních napětí jen vnějšími součástkami bez nutnosti přizpůsobení se relativně přesným

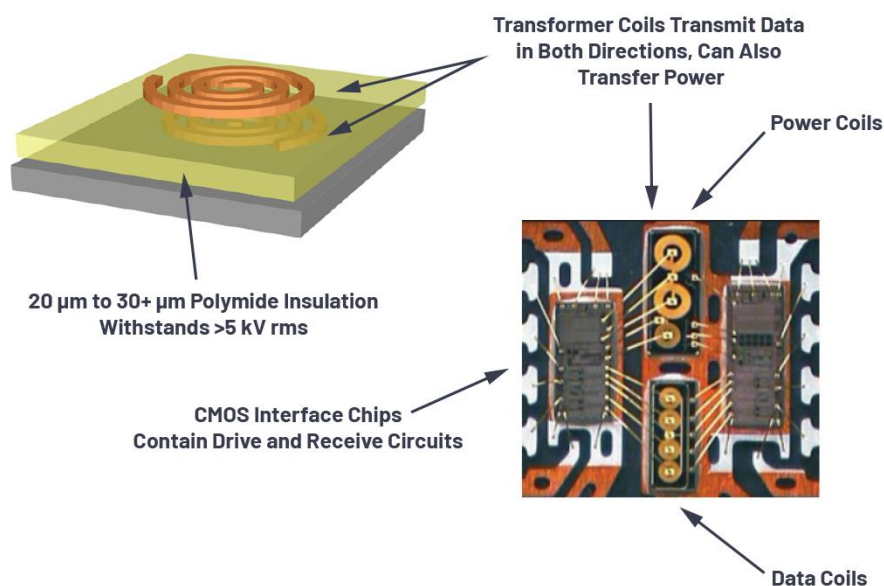
požadavkům na logické úrovni u složitějších oddělovačů. U optického oddělení lze rovněž využít přímo „analogový“ parametr kanálu – CTR (Current Transfer Ratio) – poměrný přenos proudu – poměr výstupního ku vstupnímu proudu, který je ovšem závislý na stárnutí oddělovače, okolní teplotě a dalších parametrech a bývá tedy výrobcem garantován jen v relativně širokém rozsahu hodnot a udáván převodní charakteristikou s širokými mezemi rozptylu. [2]



Obr. 2: Řez optronem, izolace silikonem s polyimidovou fólií [1]

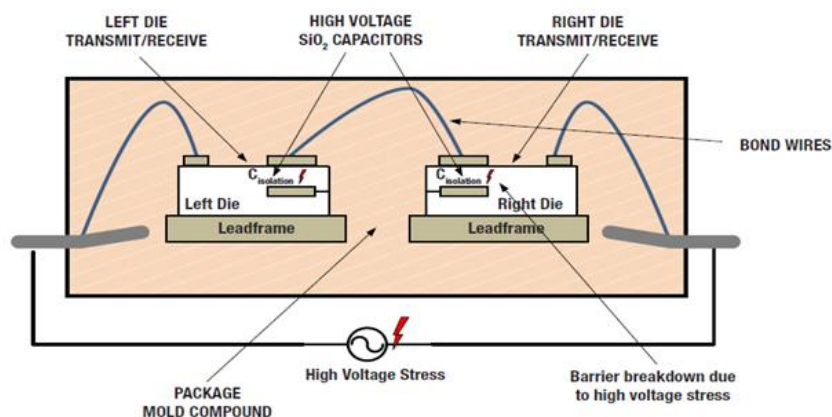
Induktivně – Galvanické oddělení je zajištěno přenosem informace ve formě magnetické energie transformátorem, který má primární a sekundární vinutí oddělené elektrickým izolantem. Zapojení se provozují při různých frekvencích – při nízkých je nutno využít transformátory na jádrech, při vysokých je oddělení provozováno bez jádra. U moderních transformátorů s jádrem je jako izolace mezi vinutími obvykle kapton nebo jiný polyimid. Při použití při vysokých frekvencích (MHz) bez jádra jsou využívány rovinné (planární) cívky, kde jako izolace slouží například epoxidová pryskyřice laminátu plošných spojů – využito v hybridních modulech, kde jsou plošné cívky transformátoru umístěny ve vnitřních vrstvách substrátového plošného spoje, na kterém je osazen zbytek obvodů a celý hybridní integrovaný obvod je poté zapouzdřen. Další je monolitické řešení, kdy jsou na čipu vytvořeny rovinné cívky s vloženou izolační vrstvou (obvykle polyimidu nebo oxidu křemičitého) a na izolaci je vytvořena druhá cívka připojená k druhému čipu v jednom pouzdře. Elektrická pevnost izolace transformátorů je cca 300 V/ μm . Transformátorová vazba nedokáže přímo přenést stejnosměrnou složku, a proto samostatné transformátory musí přenášet signály se střídavými složkami. Integrovaná řešení, která obsahují další obvody pro přeložení do vyššího frekvenčního pásma, musejí elektronicky zajistit i zakódování stejnosměrné složky pro její rekonstrukci na výstupu. Dosahují vysoké přenosové rychlosti (cca >100 Mb/s) díky malým indukčnostem transformátoru, ale z principu přenosu informace magnetickým polem mají nižší odolnost elektromagnetickému

rušení. Technologie s transformátory na čipu je využívána například firmou ADI (a to s izolací z polyimidu) nebo firmou Silicon Labs (s izolací z oxidu křemičitého). [3]



Obr. 3: Induktivní oddělení s planárními cívkami [11]

Kapacitně – Galvanické oddělení je zajištěno přenosem informace ve formě elektrostatické energie přes kondenzátor tak malé kapacity, že není schopen přenést stejnosměrný proud ani střídavý proud (relativně) nízkých frekvencí. Technologie je využívána v podobě integrovaných obvodů, kde jsou kondenzátory vytvořeny na čipech, které rovněž obsahují podpůrné obvody zajišťující modulaci a přenos stejnosměrné složky. Jako izolant je použit nejčastěji oxid křemičitý (elektrická pevnost 1000 V/μm), přenosová rychlost je velká (cca >100 Mb/s) – jsou nutné jen malé náboje, které lze přesouvat rychle. Technologie má rovněž vysokou odolnost elektromagnetickému rušení – malé kondenzátory mají jen malé parazitní kapacity s okolím, kanál je navíc často proveden jako diferenciální pomocí dvou kondenzátorových cest. (Technologie je využívána například firmou TI)



Obr. 4: Kapacitní oddělení s plošnými kondenzátory na čipu [III]

1.2.4 Samostatné oddělovače vs. integrovaná řešení

Samostatné oddělovače – historicky starší způsob provedení oddělení – samostatná součástka zajišťující galvanické oddělení (kanál přenosového systému) a samostatné obvody po zpracování přenášeného signálu. Jde například u induktivního oddělení o impulzní transformátory pro buzení tyristorů, u optického o optočleny s přímo vyvedenou LED a prvkem detekujícím záření a u kapacitního o samostatné kondenzátory používané pro oddělení stejnosměrné složky (měření, zesilovače apod.), při použití v obvodu podobném výkonovému měniči například pro oddělení anténního konektoru v televizorech s obvody neoddělenými od sítě.

Integrovaná řešení – kombinace samotného oddělovače s dalšími obvody v jednom pouzdře – pro snížení počtu nutných vnějších součástí a komfort při návrhu obvodů. Existují v různé složitosti, od jednoduchých optotronů s optotriakem, které mají stále přímo vyvedenou vysílací LED, ale složitější přijímací stranu zajišťující spínání v nule, po komplikované do jednoho pouzdra integrované izolované zesilovače, budiče, A/D převodníky a digitální izolátory (hlavní součást této práce). Dalším moderním řešením je vestavba budicích obvodů často i s galvanickým oddělením přímo do pouzdra výkonového bloku (například častá kombinace 3 půlmůstky, tedy 6 tranzistorů a 6 diod a jejich budicí obvody).

Porovnání způsobů provedení – Pro výrobu zařízení je výhodou integrovaných oddělovačů, tak jako u jakéhokoliv jiného integrovaného celku, snazší obvodové řešení, kdy je možno celé galvanické oddělení i s ostatními funkcemi při návrhu obvodu považovat za uzavřený funkční blok jen se vstupy a výstupy, což je výhodné i při certifikaci výrobku.

Další výhodou je nižší cena daná masovostí výroby (porovnání cena integrovaného oddělovače vs. cena oddělovače a součástek dalších nutných obvodů), dále nižší poruchovost zařízení daná nižším počtem součástek v obvodu, obvykle i širší rozsah pracovních teplot, delší životnost, vyšší odolnost rušení apod. V pozdějším životě zařízení může být obvykle naopak výhodnější řešení z jednotlivých, ne tolik specializovaných, součástek, které je snazší v případě poruchy nahradit. Pro izolační schopnosti integrovaného oddělovače jsou naopak nevýhodou menší rozměry, které nutně znamenají menší tloušťku izolace, která i při použití kvalitních izolačních materiálů není tak houževnatá, jako izolace s větší tloušťkou, nicméně pro nejčastější výkonové měniče jsou parametry integrovaných oddělovačů obvykle naprosto dostatečné, jen ve velmi náročných aplikacích nebo například ve zdravotnictví jsou stále většinou využívány optické oddělovače a indukční oddělovače s transformátory s jádrem.

2 Přenos číslicových signálů

2.1 Základní vlastnosti

Číslicovým přenosem je myšlen přenos dvouhodnotové informace, tedy informace zakódované do logických úrovní u signálu, případně informace zapnuto resp. vypnuto u budících signálů.

2.2 Přenos budících signálů

Je první velkou podmnožinou přenosu číslicových signálů – výkonové polovodiče jsou provozovány zásadně ve spínacím režimu, takže tomu odpovídají i budící signály, které znají jen úroveň „zapnuto“ a „vypnuto“.

2.2.1 Používané výkonové polovodiče

2.2.1.1 MOSFET

Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor - polem řízený unipolární tranzistor. Konstrukčně se skládá z dotovaného křemíkového substrátu jedné vodivosti, obvykle P, a do něj dotovaných dvou oblastí s opačnou vodivostí – elektrody D – drain a S – source, mezi kterými bude vznikat v substrátu kanál, nad kterým je přes izolační vrstvu (oxidu křemičitého – **Oxide**) napařena řídicí elektroda (hliníková, obecně kovová – **Metal**) - hradlo, gate, G. Po přivedení náboje dané polaritě na G (v případě substrátu P musí být náboj kladný) se přesunou minoritní nosiče v substrátu blíže k řídicí elektrodě a vznikne lokální „ostrov“ opačného typu, než je substrát – vznikl kanál, který propojí ostrůvky elektrod D a S, které jsou stejného typu, jako kanál (v případě substrátu typu P vzniká kanál typu N – jedná se o N-FET. V plně otevřeném stavu se polem řízený tranzistor mezi elektrodami D a S chová čistě jako vodič s odporem, ztrátový výkon na tranzistoru je tedy dán jen procházejícím proudem a odporem kanálu v sepnutém stavu. Materiálem pro výrobu MOSFET je křemík případně karbid křemíku (SiC), což je zatím stále nová technologie, která ovšem umožňuje provoz při vyšším napětí i spínací frekvenci než křemík.

Spínání polem řízeného tranzistoru: Pro zapnutí tranzistoru je nutno přivést na řídicí elektrodu náboj, což se provede průtokem proudu mezi elektrodami G a S. Při obvyklém typu tranzistoru s N-kanálem to odpovídá použití kladného napětí G-S. Jelikož tepelné ztráty tranzistoru odpovídají odporu kanálu a ten zase náboji na G, je nutno provádět spínání tranzistoru co nejrychleji – impuls musí mít velkou strmost

hrany a budicí zdroj musí být schopen dodat impulzně velký proud – i když v otevřeném stavu neteče do hradla téměř žádný proud, při zapnutí se G chová jako vybitý kondenzátor. V sepnutém stavu je teoreticky možné spoléhat na izolaci pod hradlem a žádný proud nedodávat, ale vlivem neideálnosti součástky – svodu, je nutno udržovat v sepnutém stavu stále napětí G-S a malý proud G. Vypnutí je, ze stejného důvodu jako zapnutí, nutno provést rychle, proto se elektroda G propojuje s elektrodou S, je tedy připojené nulové napětí G-S, lze připojit i záporné napětí podobně jako u IGBT, ale vzhledem k použití MOSFET při nižších výkonech to obvykle není nutné a využíváné. Spínací frekvence měniče s MOSFET je omezena právě kapacitami tranzistoru, které jsou relativně velké. [2] [4]

2.2.1.2 IGBT

Insulated Gate Bipolar Transistor – jedná se o strukturu obdobnou kombinaci bipolárního tranzistoru na výkonové straně a unipolárního tranzistoru na straně spínací. Elektrody jsou emitor – E, kolektor – C a řídicí G – gate, hradlo.

Spínání IGBT: Je obdobné jako spínání MOSFETu, pro sepnutí je nutno nabít řídicí elektrodu, což se provede pomocí napětí připojeného mezi G a E. Vzhledem k použití IGBT při řádově vyšších výkonech se při vypínání často nejen propojuje G a E ale připojuje se napětí G-E opačné polarity, aby bylo možné odvést náboj z hradla ještě rychleji. Spínací frekvence měniče je omezena pomalým uzavíráním bipolárního přechodu i po vybití hradla, což snižuje možné spínací frekvence. Dalším jevem omezujícím spínací frekvence je riziko tyristorového (= hradlem nevypnutelného) průrazu dané strukturou IGBT, ke kterému může dojít při provozu s velkou strmostí napětí při vypínání. Z tranzistorových měničů mají tedy měniče s IGBT nejnižší spínací frekvence.

2.2.1.3 HEMT

High Electron Mobility Transistor – ve výkonové elektronice nejnověji používaná spínací součástka, delší dobu využívána ve vysokofrekvenční technice. Materiálem jsou polovodiče se širokým zakázaným pásem (wide band gap semiconductor – WBGS) – nejčastěji GaN – galium nitrid, InN – indium nitrid (zatím spíše výzkum) apod. Existuje pouze ve variantě s kanálem N, kvůli nízké pohyblivosti děr v porovnání s elektrony. Polem řízený tranzistor využívá heteropřechodu dvou polovodičů s různými energetickými hladinami (např. GaN a AlGaIn) kde dojde vlivem rozdílných energetických hladin k vytvoření jeden atom vysoké vrstvy

elektronů – elektronový plyn – 2DEG (2 dimensional electron gas) ve které se elektrony mohou pohybovat bez srážek – tedy výrazně rychleji než v objemu polovodiče klasického kanálu, což snižuje odpor sepnutého kanálu a zvyšuje možnou provozní rychlost. Vzhledem k tomu, že kanál vzniká na styku polovodičů již při výrobě, je základním typem tranzistoru varianta s vodivým kanálem (D-Mode – depletion mode), pro řízení je nicméně výhodnější indukovaný kanál, což se řeší umístěním řídicí elektrody nad kanálem na ostrov polovodiče P, který bez náboje na G vyčerpá – přeruší – kanál pod sebou a při nabití elektrody G je jeho vliv vyrušen a kanál se obnoví (E-HEMT, E-Mode HEMT – enhancement mode). [5] [6]

Spínání HEMT: Opět obdobné MOSFET, ale vzhledem k vysoké rychlosti elektronů v elektronové vrstvě – tedy rychle vznikajícímu a zanikajícímu kanálu – umožňuje provoz při vyšších frekvencích, což je pro výkonový měnič výhodnější, ale je nutné zároveň využívat velmi rychlé budicí obvody.

2.2.1.4 Tyristory

Historicky první ve výkonové elektronice reálně použitelný říditelný polovodič, ve většině aplikací nahrazen tranzistory, nicméně stále používán v měničích pro nejvyšší výkony. Pro galvanicky oddělené buzení se využívají transformátory připojené mezi G a K, budicí obvody jako takové jsou velmi odlišné od budicích obvodů pro tranzistory, fungují spíše jako zdroj proudu. Zajímavostí je u vypínatelných tyristorů, respektive u celých bloků i s elektronikou např. IGCT používaných při vysokých napětích často využívané buzení přes optické vlákno – kvůli vysokým napětím, ale i extrémnímu rušení danému obrovskými procházejícími výkony. [7]

2.2.2 Požadavky na buzení používaných součástek

2.2.2.1 Shrnutí požadavků na buzení výkonových polovodičů a energie potřebná k ovládní polovodičů

Tranzistory – první složkou ztrát na tranzistorech je energie dodaná na hradlo a po odvedení zmařená, energie je dána nutným nábojem na hradle, tedy řízením neomezená. Lze ji vypočítat z nutného náboje, který bývá v katalogu, a ze spínací frekvence. Druhou složkou ztrát jsou ztráty na nedokonale sepnutém tranzistoru – při spínání a vypínání – které závisí na strmosti budicích impulzů a snažíme se je co nejvíce omezit rychlým přechodem mezi stavy. Další složkou ztrát tvoří ztráty na sepnutém tranzistoru, které jsou opět dány součástkou, odporem kanálu resp. výstupní voltampérovou charakteristikou, a jsou řízením neomezené. [2]

Tyristor – ztráty na sepnutém dány součinem napětí a proudu podle voltampérové charakteristiky, ztráty při sepnutí jsou dány rychlostí lavinového průrazu, která je dána přiloženým napětím A-K, což je rovněž neomezené řízením. [2]

2.2.2.2 Provedení budicích obvodů tranzistorů

Požadavkem na budicí obvody hradlových tranzistorů je rychlý přesun náboje na hradlo a z hradla při spínání. Koncovým stupněm budiče je komplementární dvojice tranzistorů připojená na kladné a záporné (nebo nulové) napětí a jejich střed na G. Pro nízké výkony obvykle stačí budit tranzistory pouze tranzistorem posíleným výstupem mikrokontroléru, při vyšších výkonech a spínacích frekvencích jsou parametry spínacího impulsu stále kritičtější a jsou potřeba stále specifičtější budicí obvody (tvarovače impulsů pro vysoké spínací frekvence, oddělený nabíjecí a vybíjecí R_G , což umožňuje nastavit průběh proudu hradla a tím i dalších veličin při spínání apod.).

V současnosti jsou, kromě specifických aplikací, nejčastěji využívány hotové monolitické budicí obvody, které v sobě obsahují jak koncový budicí stupeň (komplementární dvojici tranzistorů), tak další obvody jako tvarovače pulzů, ochrany před sepnutím při přechodném ději apod. Často navíc obsahují právě i galvanické oddělení – izolační budiče. [4]

2.2.3 Izolační budiče a optické oddělení:

Izolační budiče jsou kombinací čipu vysílajícího přes potenciálovou bariéru z řídicí části a přijímacího čipu pro spínání tranzistoru na výkonové straně v jednom pouzdře. Izolační budiče jsou, obdobně jako neizolované budiče, vyráběny buď pro řízení jednoho tranzistoru, nebo častěji pro řízení celého půlmůstku. Integrované obvody pro buzení celého půlmůstku pak mají v jednom pouzdře tři čipy – čip vysílající pokyny přes potenciálovou bariéru a dva oddělené čipy řídicí vždy svůj výkonový tranzistor.

Parametry charakterizující budicí obvody (podle [8]):

Dopravní zpoždění: definováno jako čas mezi dosažením vstupní rozhodovací úrovně a 10% výstupní úrovně při vzestupné hraně a 90% výstupní úrovně při sestupné hraně. (podle [8], další častou volbou úrovní je například dosažení vždy polovičního napětí). Budicí obvody pro jednotlivé tranzistory mají dopravní zpoždění obvykle menší než 20 ns, budiče půlmůstku obvykle více než 100 ns vlivem složitější struktury pro buzení horního tranzistoru, která se projeví výrazně – budič spodního tranzistoru odpovídá budiči jednotlivého a je tedy nutně pro spolupráci s budičem horního tranzistoru vybaven odpovídajícím přídatným zpožďovacím obvodem. Hodnoty jsou charakteristické pro induktivní a kapacitní oddělení, kdy technologie samotná je schopna rychlejšího přenosu,

ale kvůli odolnosti rušení a zabránění parazitnímu spínání jsou obvody vybaveny množstvím filtrů zhoršujících celkovou dynamiku. U optického oddělení lze dosáhnout uvedených hodnot také, ale reálně se klasické optické oddělovače vyrábějí spíše s vyšším zpožděním velkým nižší stovky nanosekund, na jehož dosažení není potřebná náročná, tedy drahá, technologie výroby.

Zkreslení délky impulsu – Rozdíl dopravního zpoždění při přenosu vzestupné a sestupné hrany signálu – uváděno obvykle jako absolutní hodnota, ze které není na první pohled poznat, zda došlo ke zkrácení nebo prodloužení impulsu. Nejvýrazněji se projevuje u optické izolace, kdy LED má výrazný rozdíl mezi zapínacím a vypínacím časem a zkreslení může být desítky až stovky ns. U induktivních a kapacitních jde spíše o nízké desítky ns.

Rozdíl mezi kanály – Rozdíl dopravního zpoždění mezi jednotlivými kanály je u kapacitního a induktivního oddělení malý – je omezen při výrobě párováním čipů. U optického oddělení může hrát významnou roli vzhledem k obvyklému použití několika kusů oddělovače a rozptylu jejich výrobních parametrů.

2.2.4 Porovnání jednotlivých způsobů oddělení budících signálů

Historicky nejstarší používané bylo optické oddělení ve formě samostatných optronů a budících obvodů tranzistorů, ať ještě neintegrováných nebo integrováných, které má ovšem některé nepříjemné vlastnosti, kvůli kterým je dnes nahrazováno kapacitním nebo induktivním. Klasické optické oddělení má malou rychlost, což přímo vylučuje jeho použití pro rychlé buzení moderních součástek z SiC nebo GaN, ale i pro „pomalé“ součástky jako IGBT je nutné vkládat delší mrtvé časy kvůli rozdílnému zapínacímu a vypínacímu času LED a odchylkám jednotlivých kusů při buzení více tranzistorů (cca >200 ns). Další nepříjemnou vlastností je stárnutí LED, urychlované hlavně vlivem vysoké teploty a vstupního proudu, čímž je omezena pracovní teplota měniče, ale i při omezené teplotě má optický oddělovač omezenou životnost (např. modelový příklad podle [9] – při vstupním proudu 50 mA a teplotě pouze 40°C vychází životnost definovaná poklesem vydávaného světla na 70% na 8000 h, tedy < 1 rok (čistého času svícení), při průmyslových 85°C a nízkém proudu 20 mA vychází životnost cca 100000 h, tedy přibližně 11 let). Induktivní i kapacitní oddělovače mají v dnešní době navzájem srovnatelné parametry a možnosti využití v obvodu a netrpí na výše uvedené nedostatky, resp. mají o řády lepší parametry. Jsou navíc vlivem vyšší integrace menší a mají nižší spotřebu, což způsobilo, že vytlačují optickou

izolaci všude tam, kde nejsou nároky na extrémní izolační pevnosti. Integrované budiče mají obvykle vestavěno i množství uživatelsky přívětivých funkcí, například [10]:

Blokování tranzistorů – speciální pin EN (ENABLE), při využití obvod ignoruje budící signály a blokuje výkonové prvky v Fail-Safe stavu – využíváno například při náběhu měniče, restartu mikrokontroléru nebo při odstavení měniče detekcí poruchy.

UVLO – **undervoltage lockout** – měří napájecí napětí na obou stranách budiče a při jeho poklesu zablokuje výkonový prvek, neboť při nízkém napětí hrozí, že nebude výkonový tranzistor dokonale otevřen a bude tedy mít velké ztráty, které způsobí jeho tepelné zničení.

Oddělené výstupy logických úrovní – možnost využít různé hodnoty odporů R_G pro optimalizaci průběhu proudu hradla při zapínání a vypínání. Alternativou je využití dvojice antiparalelních diod v sérii s R_G pro daný směr proudu – při vysokých spínacích frekvencích náročné.

Miller Clamp – při sepnutí horního tranzistoru půlmůstku dojde ke skoku kolektoru spodního tranzistoru na plné napájecí stejnosměrné napětí. Tímto skokem se objeví náboj na jeho kapacitě C_{GC} (Millerova kapacita) a projeví se jako změna napětí na hradle tranzistoru. Jelikož je ve vypnutém stavu G propojen s emitorem spodního, tedy se zemí stejnosměrného obvodu, teče proud při nabíjení kapacity C_{GC} přes R_G a tranzistor budiče – na spodním tranzistoru budiče a odporech cesty může vzniknout tak velký úbytek napětí, tedy U_{GE} , že dojde k přotevření tranzistoru, které může vést k parazitnímu sepnutí. Budicí integrované obvody mají vestavěnu ještě jednu zemnicí cestu s tranzistorem a s cestou s minimálními odpory, která připne G k E bez přídavných R_G . [11]

Mrtvý čas – pouze v obvodech pro buzení dvou tranzistorů. Mrtvý čas je řešen primárně řízením, nicméně budiče mají často rovněž vestavěny obvody pro kontrolu mrtvého času, které je obvykle možné zablokovat a nevyužít.

Detekce poruch a blokování měniče – Budicí obvody sledují parametry na výkonovém tranzistoru a reagují na některé poruchové stavy. Například zkraty, které se projeví výrazným zvýšením U_{CE} (pro IGBT) resp. U_{DS} (pro MOSFET apod.), jsou vypnuty budícím obvodem přímo na výkonové straně, a na stranu buzení je jen přenesena informace o poruše a zablokování měniče. [4]

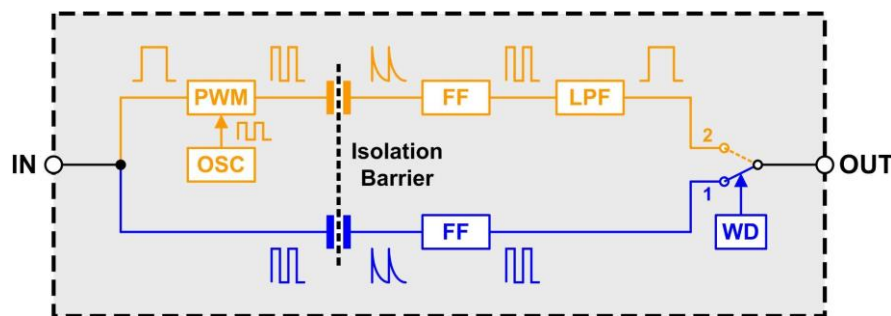
2.3 Digitální izolátor:

Přenáší data, tedy signály zakódované libovolně do posloupnosti daných napěťových úrovní (= logických úrovní), přes potenciálovou bariéru. Ve výkonových měničích nejčastěji mezi řídicím procesorem a periferií na výkonové straně, případně mezi různými úrovněmi

mikrokontrolérů na řídicí straně, kde mohou být použity buď opět izolátory pro „neznámý“ formát dat, nebo přímo izolátory pro komunikační rozhraní (CAN, RSxxx, I²C apod.), které tvoří největší podmnožinu digitálních izolátorů. Jde o integrované obvody obvykle přenášející několik paralelních datových kanálů, často v obou směrech. Využívají kapacitní nebo induktivní vazbu. Jedná se opět o vysoce integrovaná zařízení – obsahují nejen samotné obvody pro modulaci/demodulaci a případně tvarování impulzů, ale obvykle mají vestavěné i různé další funkce. První skupinou přídatných funkcí jsou ochrany, kdy například při výpadku napájení nebo nedefinované úrovni vstupu přechází výstup do definovaného Fail-Safe stavu. Další výhodnou vlastností je to, že často mají do jednoho pouzdra vestavěn i galvanicky izolovaný oddělovač pro přenos energie na výkonovou stranu, například pro napájení připojeného zařízení.

2.3.1 Kapacitní vazba:

Provedení jako dva monolitické čipy ve společném pouzdře, mezi kterými prochází potenciálová bariéra. Směrem k potenciálové bariéře končí obvykle oba (zesílená izolace – dva kondenzátory v sérii) čipy kondenzátory s dielektrikem z oxidu křemičitého. Vstupní data jsou upravena pro přenos izolovaným kanálem – kondenzátory. Je využívána buď modulace podle hran, kdy je přes kapacitní bariéru přenášena derivace vstupního pulzu – kladný nebo záporný impuls pro náběžnou nebo sestupnou hranu (používá například Texas Instruments). Další možností je modulace podle úrovně – ASK (OOK) – která vykazuje lepší odolnost rušení než modulace podle hran (používá například Silicon Labs), nicméně modulace podle hran je také využívána – kvůli nižší energetické náročnosti. [12] [13]

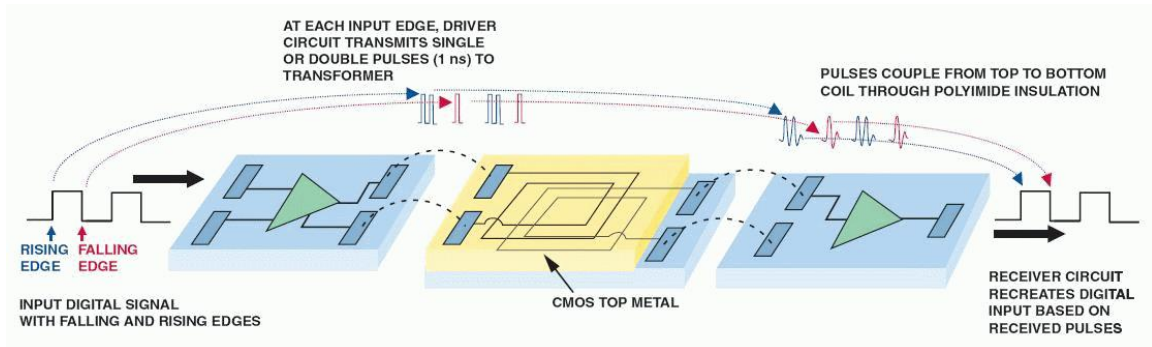


Obr. 5: Kapacitní digitální izolátor využívající přenos podle hran pro vyšší frekvence a modulaci pro nízké frekvence a stejnosměrné signály [IV]

2.3.2 Induktivní vazba:

Jsou využívány transformátory s planárními cívkami (viz 1.2.3). Data jsou na straně vysílací opět upravena pro přenos prostředím izolačního kanálu – transformátorem. Je

využíváno buď ASK/OOK – energeticky náročnější nebo modulace podle hran – signál nejčastěji převeden na daný počet period pro vzestupnou a pro sestupnou hranu [3] [12].



Obr. 6: Digitální izolátor využívající induktivní vazbu a převod hran na počet period [V]

2.3.3 Přenos dat optickým oddělením

Obvykle se neoznačuje jako digitální izolátor. Historicky jde o nejpoužívanější metodu přenosu dat, i když obvykle mimo výkonovou elektroniku, neboť v době největšího rozmachu přenosu opticky oddělených dat neexistovaly dostupné periferie (A/D převodníky), které by byly v měničích využívány. Existuje množství speciálních optočlenů s výstupem uzpůsobeným přímo pro práci v logických úrovních (klopné obvody, případně i tvarovače impulzu apod.). V dnešní době se ve výkonových měničích využívá už téměř jen ve vysokonapěťových aplikacích, neboť digitální izolátory založené na kapacitním a induktivním oddělení mají pro většinu měničů pracujících s běžnými napětími dostatečnou izolační pevnost. Induktivní a kapacitní oddělovače mají navíc menší rozměry a spotřebu, a vlivem většího počtu „hotových“ kanálů, kdy není třeba řešit mimo integrovaný obvod tvarování impulzů, nastavování vstupního proudu a podobné, i složitost zakomponování do obvodu.

3 Přenos analogových signálů

3.1 Základní vlastnosti

Analogové signály jsou v měničích získány především měřením veličin výkonového obvodu a jejich galvanické oddělení je nutné pro možnost jejich zpracování na straně řízení.

3.1.1 Měřené veličiny

Napětí:

Lze měřit přímo (napěťové děliče) a poté dále zpracovat pomocí izolovaných zesilovačů nebo izolovaných A/D převodníků.

Proud:

Přímé měření: měření úbytku napětí na bočníku. Pro proudy cca <100 A, na bočníku vznikají ztráty, pro galvanické oddělení je nutné použití izolovaných zesilovačů. Proud lze rovněž měřit přímo jako úbytek napětí mezi C-E, respektive D-S.

Nepřímé měření: pomocí Hallovy sondy – pro proudy zhruba v rozsahu 1-1000 A, pro malé proudy se jedná o novou technologii. Jsou využívána různá provedení – mechanicky řešené moduly s magnetickým obvodem nebo vhodně umístěná Hallova sonda spolupracující s cestou na DPS (případně i jiným typem vodiče). Další možností je integrovaný obvod, kterým přímo prochází měřený proud (zde může být problematické bezpečné galvanické oddělení). Obecně je při magnetickém měření proudu galvanické oddělení zajištěno principem měření, kdy nejsou obvody elektricky spojené. [14]

Teplota:

Galvanicky propojeně: Jako úbytek napětí na antiparalelní diodě při známém proudu – pro oddělení nutný izolovaný zesilovač nebo A/D převodník.

Galvanicky odděleně: Teplotním senzorem – termočlánkem nebo termistorem. Měření termistorem spočívá v měření úbytku napětí na teplotně závislém rezistoru a jeho následném převodu na teplotu podle známé voltampérové charakteristiky. Měření termočlánkem funguje na principu termoelektrického jevu, kdy na spoji dvojice kovů vzniká pro danou teplotu charakteristické (termoelektrické) napětí, které je snímáno a převedeno na teplotu. Teplotní senzory jsou obvykle umístěny přímo v pouzdrech výkonových polovodičů, ale galvanicky odděleně od výkonového obvodu.

3.2 Principy přenosu signálu

Izolované zesilovače i izolované A/D převodníky využívají obdobné metody provedení potenciálové bariéry, které se příliš neliší ani od bariéry izolovaných budičů a digitálních izolátorů. Popis metod v kapitole 1.2.3

Specifika optické vazby: Existují optrony s vysokou linearitou pro použití pro přímý přenos analogového signálu, ale optický přenos je využíván i s modulací. Optický přenos je využíván například firmou Toshiba pro zesilovače a firmou Broadcom/Avago pro A/D převodníky.

Specifika induktivní vazby: Pro přenos modulovaného signálu je využíván transformátor, u izolovaných A/D převodníků téměř výhradně plošný na čipu, u izolovaných zesilovačů jsou časté i hybridní varianty s transformátorem ve vnitřních vrstvách substrátového plošného spoje nebo spíše historicky i s transformátorem s toroidním feritovým jádrem. Oddělovače využívající induktivní vazbu často obsahují rovnou i přenos energie, takže jsou napájeny jen z výstupní strany.

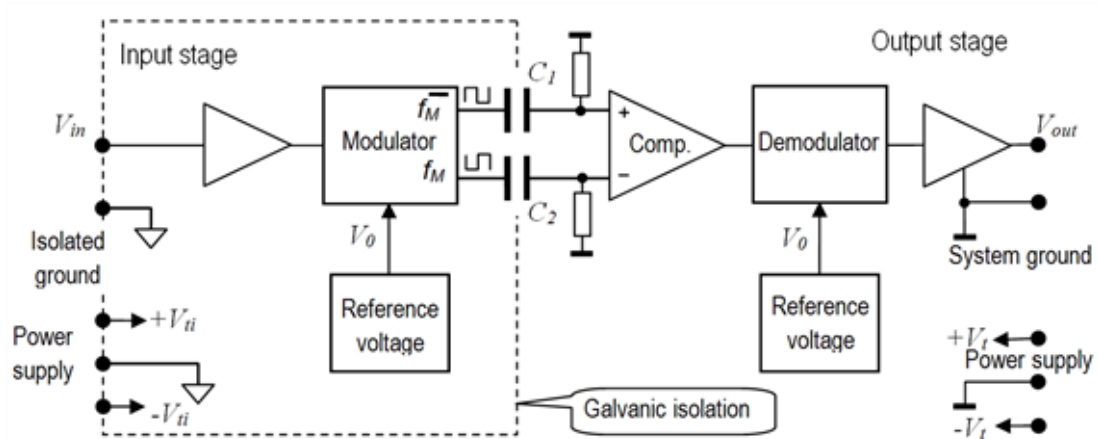
3.3 Izolované zesilovače (isolation amplifiers, ISO amp):

Použitím se jedná o ekvivalent operačního zesilovače s galvanicky odděleným vstupem a výstupem. Je tvořen na vstupní výkonové i na výstupní řídicí straně obvody zapojením obdobnými jako operační zesilovač, aby se výsledné zapojení vzhledem k obvodu chovalo pouze jako zesilovač a samotné galvanické oddělení nekomplikovalo další obvodový návrh. Zapojení má obvykle pevné zesílení, nejčastěji jednotkové, výjimečně (např. často u hybridních modulů využívajících induktivní vazbu) je možno připojováním vnějších součástek (rezistorů) měnit zesílení, obvykle obou částí samostatně. Přenos přes izolační bariéru probíhá pomocí modulace, ať analogové (např. amplitudové, frekvenční) nebo digitální (PWM, delta-sigma). [15]

Katalogové parametry jsou ze dvou skupin: parametry zesilovače a parametry oddělovače. Jako parametry zesilovače bývají uváděny například: šířka pásma, obvykle cca 0-400 kHz; vstupní napěťový offset; CMR; linearita; drifty a další. Z parametrů galvanického oddělení to bývá: napěťová odolnost: pracovní napětí izolace – trvalá efektivní hodnota, špičkové napětí izolace – krátkodobé (definováno obvykle jako šedesátisekundové); CMTI apod. [16] [15]

Ve výkonových měničích je v dnešní době při návrhu většinou nahrazen izolovaným A/D převodníkem, vzhledem k obvyklému číslicovému řízení, kdy by byla analogová

hodnota stejně převáděna na digitální, někdy je využíván v kombinaci s A/D převodníky zabudovanými přímo v mikrokontroléru, čímž lze ušetřit digitální vstupy a zároveň je výsledné provedení rychlejší než samostatný A/D převodník. Izolační zesilovače jsou nicméně většinou využívány spíše ve zdravotnictví apod.



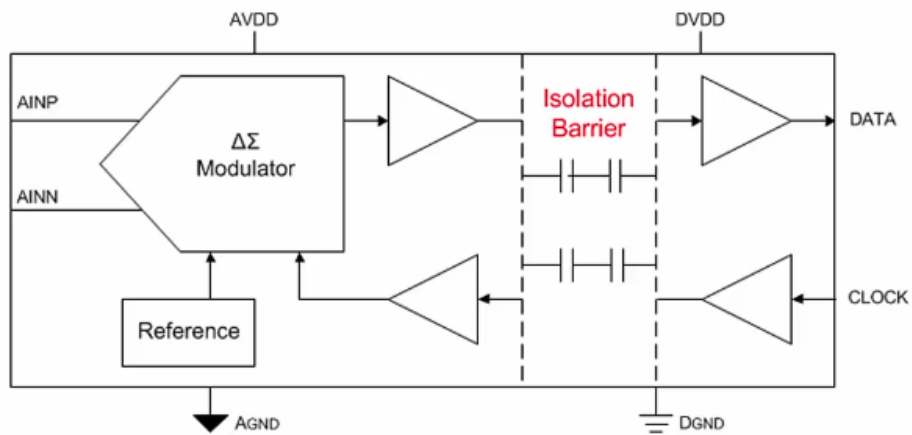
Obr. 7: Blokové schéma izolovaného zesilovače [VI]

3.4 Izolované A/D převodníky:

Převádějí analogový signál na číselný. Na vstupní straně mají diferenciální vstup stejně jako izolační zesilovače, jeho výstup je přiveden na (nejčastěji) delta-sigma modulátor, který z analogového signálu vytvoří jednobitovou sériovou linku, která je převedena přes potenciálovou bariéru. Na výstupní straně je signál natvarován a přenesen na výstup. Signál je zpracováván v procesoru, který obvykle zároveň dodává hodinový signál pro delta-sigma modulátor. Hodinový signál je tedy uvnitř integrovaného obvodu rovněž galvanicky oddělen a přenesen naopak na vstupní stranu. [17] [18]

V dnešní době číselného řízení měničů jde o výhodnější variantu, neboť se snížila chyba použitím jen jednoho bloku místo kombinace bloků izolačního zesilovače a samostatného A/D převodníku.

Katalogové parametry jsou opět ze dvou skupin, a to parametry A/D převodu a oddělovače. Mezi parametry A/D převodu patří např. šířka pásma; rychlost vzorkování; napěťový offset diferenciálního vstupu; CMR; drifts apod. Z parametrů oddělovače pak jde o napěťovou odolnost: pracovní napětí izolace – trvalá efektivní hodnota, špičkové napětí izolace – krátkodobé (definováno obvykle jako šedesátisekundové); CMTI a další. [17]



Functional block diagram



Obr. 8: Blokové schéma izolovaného A/D převodníku [VII]

4 Měření

4.1 Metodika

Cílem měření je ověřit na několika oddělovačích jejich dopravní zpoždění a CMTI, tedy odolnost strmosti napětí mezi stranami oddělení. Měření CMTI odpovídá metodice firmy Texas Instruments [19], měření dopravního zpoždění odpovídá katalogovým metodikám jednotlivých oddělovačů.

Při měření dopravního zpoždění jsou přiváděny na vstup oddělovačů impulsy a výstup i vstup je monitorován osciloskopem, pomocí kterého je odečteno časové zpoždění mezi vstupním a výstupním pulsem pro náběžnou a sestupnou hranu. Vstupní signál je měřen hned na MLC-interfacu, který slouží jako zdroj impulsů a odezva izolátoru je měřena na výstupní dvojici pinů.

Při měření CMTI jsou vstupy měřených oddělovačů připojeny na pevnou logickou úroveň a mezi země oddělení je připojována náběžná nebo sestupná hrana s danou strmostí napětí. Osciloskopem na výstupu oddělovačů je zjišťováno jestli, a případně při jaké strmosti, dojde k deformaci výstupního signálu, dále je měřeno napětí mezi stranami oddělení a proud indukčnosti.

4.2 Měřené oddělovače

4.2.1 H11L1V – optická vazba

Jedná se o optočlen pracující v pásmu infračerveného záření, výstup je opatřen schmittovým klopným obvodem pro dosažení digitálního chodu.

Tab. 1: Parametry H11L1V [20]

Rychlost	1 MHz
CMTI	neuveveno
Izolační napětí	5000 V ef
Kapacita mezi stranami oddělení	0,25 pF
Vysílač: Proud	max 60 mA, špičkově 1 A, typicky 10 mA
V: Závěrné napětí	6 V
V: Ztrátový výkon	100 mW
Přijímač: Ztrátový výkon	150 mW
P: Napájení	3 až 16 V
P: Proud	50 mA
P: Výstupní napětí	0 až 16 V *

* výstup je zapojen s pull-up rezistorem a při osvětlení je připínán k zemi – oddělovač invertuje napětí.

4.2.2 ADuM1301A – induktivní vazba

Jedná se o tříkanálový (při měření využit jen jeden kanál) digitální izolátor využívající planární transformátory na čipu.

Tab. 2: Parametry ADuM1301A [21]

Rychlost	1 Mb/s*
CMTI	min 25 kV/ μ s typicky 35 kV/ μ s
Izolační napětí	2,5 kV ef
Kapacita mezi stranami oddělení	1,7 pF

* varianta „A“ je nejpomalejší ADuM1301, například varianta „C“ už má minimální rychlost 90 Mb/s a typickou 120 Mb/s).

4.2.3 ISO1540DR – kapacitní vazba

Obousměrný oddělovač sběrnice I²C využívající kapacitní oddělení s kondenzátory na čipu, při měření zapojen jako digitální izolátor jen pro přenos 1 b informace.

Tab. 3: Parametry ISO1540DR [22]

Rychlost	1 MHz
CMTI	50 kV/ μ s
Izolační napětí	2,5 kV ef, 4 kV šp
Kapacita mezi stranami oddělení	1 pF

4.2.4 ISO7721 – kapacitní vazba

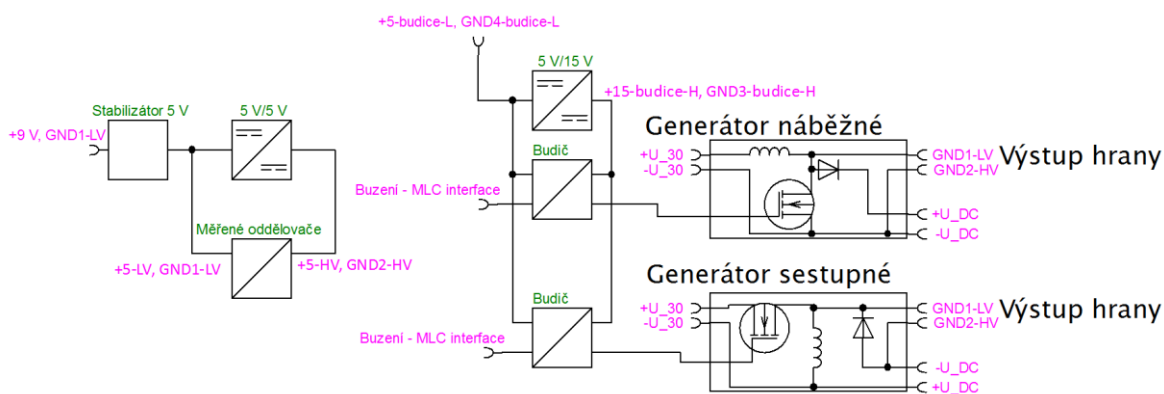
Dvoukanálový digitální izolátor využívají kapacitní oddělení s kondenzátory na čipu. Jde o nejrychlejší a nejodolnější měřený izolátor.

Tab. 4: Parametry ISO7721 [23]

Rychlost	100 Mb/s
CMTI	min. 85 kV/ μ s typicky 100 kV/ μ s
Izolační napětí	5 kV ef*
Kapacita mezi stranami oddělení	0,5 pF

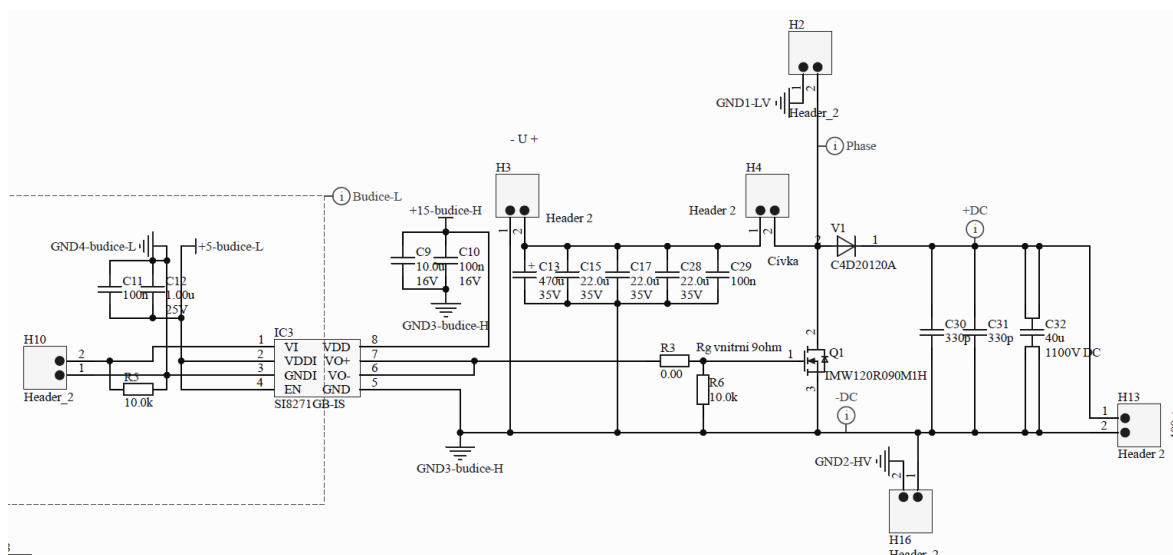
* varianta se širokým pouzdrem

4.3 Měřicí obvod – schéma



Obr. 9: Blokové schéma s popisem napájecích napětí a oddělených zemí, blokové schéma generátorů hran

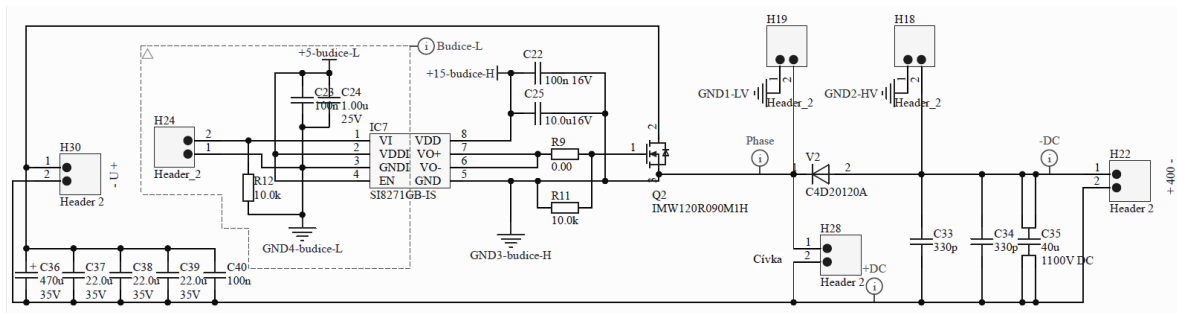
4.3.1 Generátor naběžné hrany



Obr. 10: Zapojení generátoru naběžné hrany

Pro vytvoření naběžné hrany vhodného tvaru je využita indukčnost (připojená na H4) přes kterou je sepnutím tranzistoru (Q1) zkratován zdroj (H3), čímž začne narůstat proud cívky, který po vypnutí tranzistoru způsobí nárůst napětí na cívce, a tedy i v bodě propojení H2. Po dosažení úrovně napětí připojeného na H13 začne vést dioda a zbývající energii cívky svede do kondenzátorů C30, C31 a C32. Měřené oddělovače jsou připojeny pomocí propojek H2 a H16. Původní napětí mezi zeměmi oddělovačů je napětí H3, po otevření diody se ustálí na napětí připojeném na konektor H13.

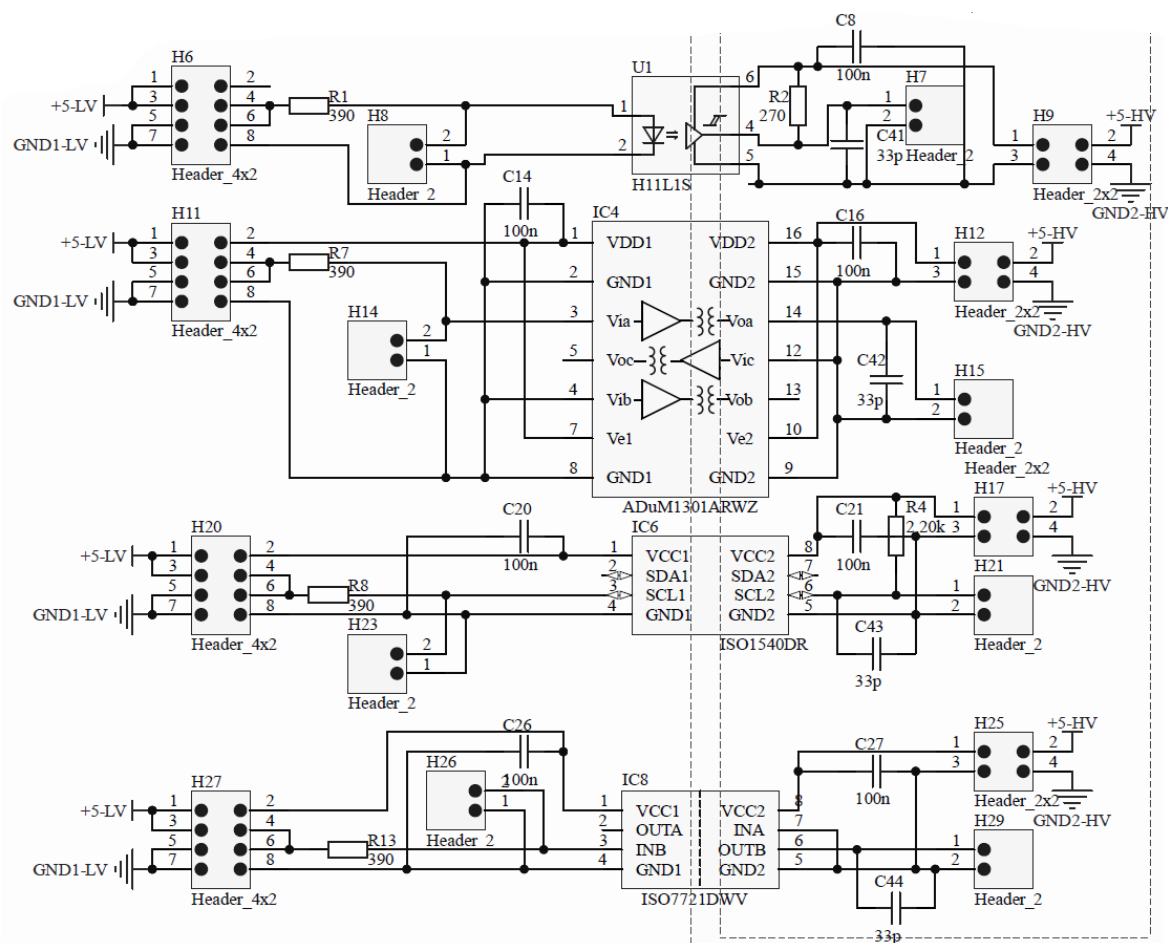
4.3.2 Generátor sestupné hrany



Obr. 11: Zapojení generátoru sestupné hrany

Je využit stejný princip jako u generátoru náběžné hrany, zdroj (H30) je zkratován tranzistorem (Q2) přes cívku (připojenou na H28). Po vypnutí tranzistoru je pro pokračování proudu cívkou nutné, aby na ní vzniklo napětí, které povede k otevření diody, tedy takové napětí na cívce, které vyrovná napětí na kondenzátorech C33, C34 a C35, které jsou nabity na původní úroveň napětí před sestupnou hranou ze zdroje H22. Měřené oddělovače jsou připojeny na anodu a katodu diody (H18 a H19), kde je původně napětí připojené na H22 a po otevření diody padá na její úbytek, tedy téměř na nulu vzhledem k velikosti původního napětí.

4.3.3 Zapojení měřených oddělovačů



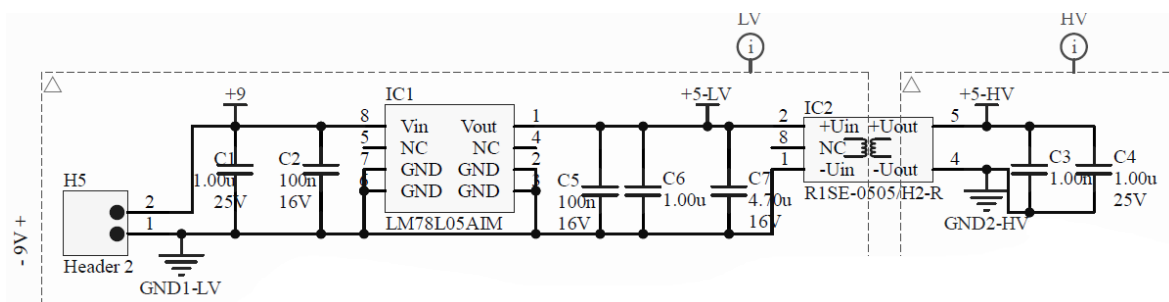
Obr. 12: Zapojení měřených oddělovačů

Měřené oddělovače jsou vybaveny odrušovacími kondenzátory podle katalogových listů. Vstupy a výstupy jsou vyvedeny na přepojovače (H6, H11, H20 a H27), které se spojí propojkami pro napájení, zem a vstupní logickou úroveň H/L. Výstupy a vstupy jsou vyvedeny na dvojici pinů pro připojení sondy osciloskopu (výstupy H7, H15, H21 a H29 a vstupy H8, H14, H23 a H26). Napájení HV strany je připojováno pomocí vždy dvou propojek (H9, H12, H17 a H25). V průběhu měření byly navíc doplněny kondenzátory na výstupy – paralelně k H7, H15, H21 a H29 – C41, C42, C43 a C44, vždy 33 pF, jsou zaneseny do schématu, ale ne na desku plošného spoje.

4.3.4 Pomocné obvody

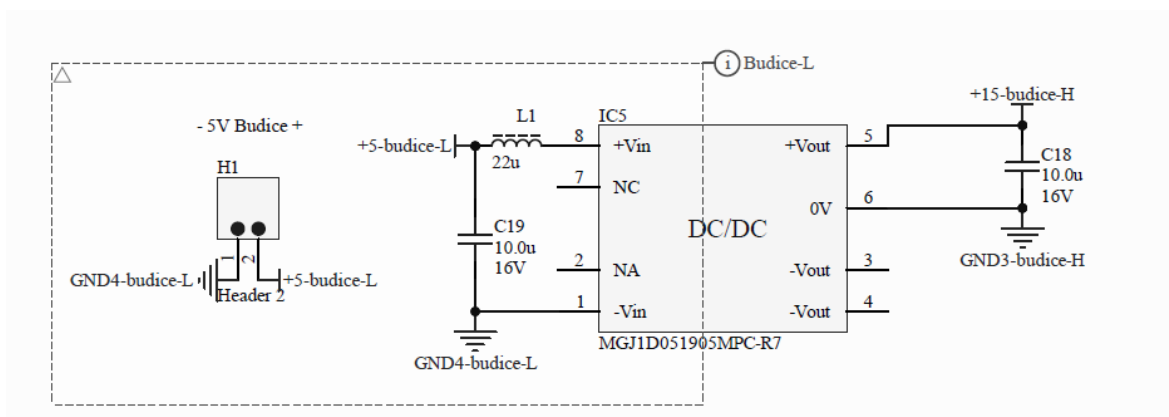
Pomocnými obvody jsou zdroje a LED indikátory jednotlivých větví napájení. Měřicí přípravek je napájen z několika napětí. Na H5 je připojeno 9 V z baterie nebo při měření bez vysokých napětí ze síťového zdroje. Na H1 je připojeno 5 V pro nízkonapětovou stranu

budičů tranzistorů, na H3 respektive H30 napětí pro nabití indukčnosti a na H13 respektive H22 napětí určující velikost napětí hrany.



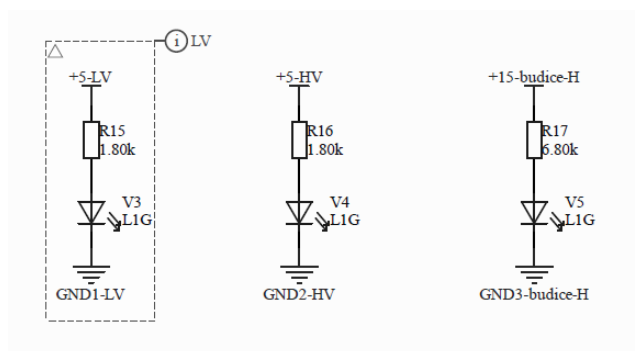
Obr. 13: Zapojení stabilizátoru 5 V a oddělovacího zdroje 5 V na 5 V

Napětí připojené na H5 je lineárním stabilizátorem 7805 sníženo na úroveň 5 V, která je využita přímo pro napájení vstupní strany oddělovačů – „LV“ – napět'ová hladina je ve schématu značena +5-LV, napětí je proti zemi GND1-LV. Výstupní strana („HV“) oddělovačů je napájena ze strany „LV“ oddělovacím zdrojem s převodem z 5 V na 5 V, typ R1SE-0505 – napět'ová hladina je značena +5-HV, napětí je proti zemi GND2-HV.



Obr. 14: Zapojení oddělovacího zdroje 5 V na 15 V

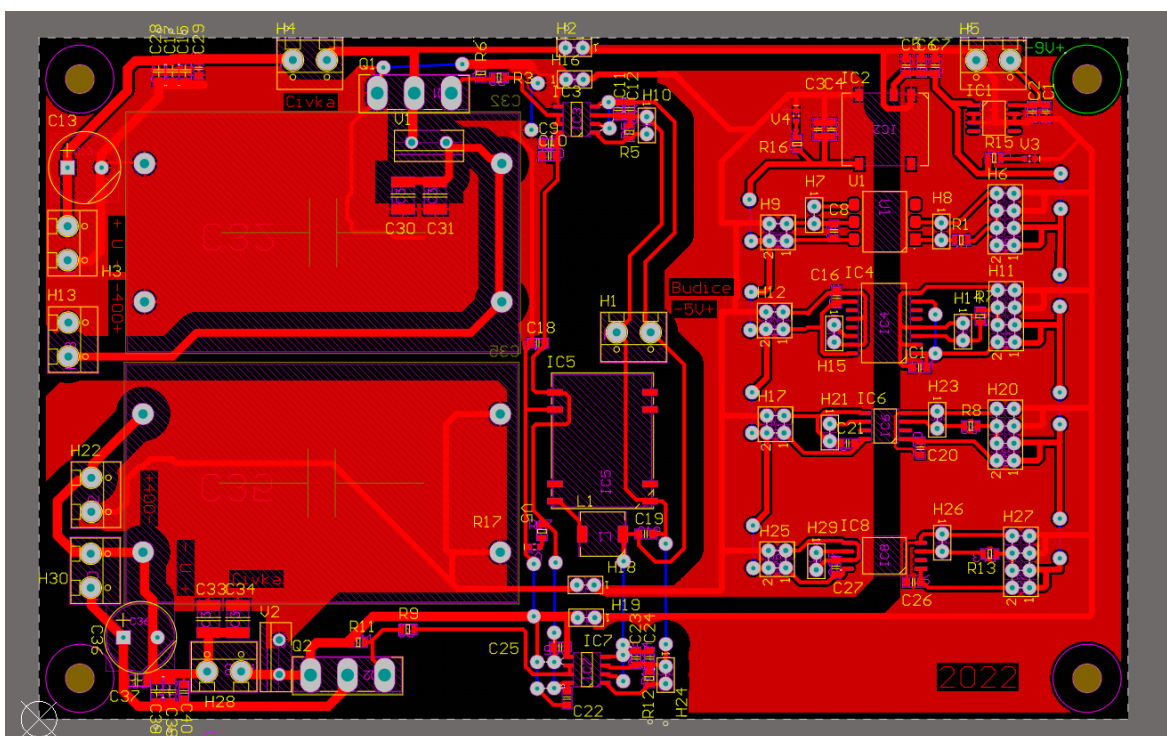
Na konektor H1 je přiváděno nezávislých 5 V pro nízkonapět'ovou stranu budičů tranzistorů, které je značeno +5-budice-L, napětí je proti zemi GND4-budice-L. Napětí je rovněž využito pro napájení oddělovacího zdroje z 5 V na napětí 15 V, které je využíváno pro spínání tranzistorů, a je značeno +15-budice-H, napětí je proti zemi GND3-budice-H.



Obr. 15: Zapojení indikačních LED

4.4 Měřicí obvod – plošný spoj

4.4.1 Návrh plošného spoje



Obr. 16: Návrh desky plošného spoje

Plošný spoj byl vytvořen v programu Altium, vzhledem k použití jako experimentální a předváděcí přípravek byl navržen s mědí, a tedy i SMD součástkami, na horní straně. Měřené oddělovače (U1 (H11L1V), IC4 (ADuM1301A), IC6 (ISO1540DR) a IC8 (ISO7721)) jsou seskupeny pod sebe okolo jedné potenciálové bariéry, mezi jejich oddělené země jsou připojovány hrany z generátorů – náběžná hrana pomocí propojek H2 a H16 a sestupná hrana pomocí propojek H18 a H19. Generátory pulsů jsou vytvořeny se snahou o co nejkratší cesty,

jejich součástky jsou seskupeny kolem krabicových kondenzátorů C32 a C35. Největší izolační vzdálenosti jsou udržovány okolo nízkonapěťové strany budičů tranzistorů, kvůli možnosti přímého propojení s MLC-interfacem.

4.4.2 Výroba plošného spoje

Provedena fotocestou, maska byla exportována přímo z programu Altium. Světlocitlivá deska byla s maskou následně vložena mezi dvě tabule skla a osvětlena ultrafialovým světlem (rtuťová výbojka 250 W, v původním stavu s luminoforem, čas cca 6 minut). Po osvětlení byla deska vyvolána v roztoku hydroxidu sodného (koncentrace 7 g/l), vyleptána v roztoku chloridu železitého, vyvrtána a nalakována kalafunou rozpuštěnou v lihu. Po osazení byla deska oživena, provedeno měření dopravního zpoždění. Nakonec proběhlo měření CMTI, a to od nižších napětí k nejvyšším, pro případ destruktivního selhání některé části obvodu.

4.5 Předpokládané výsledky měření

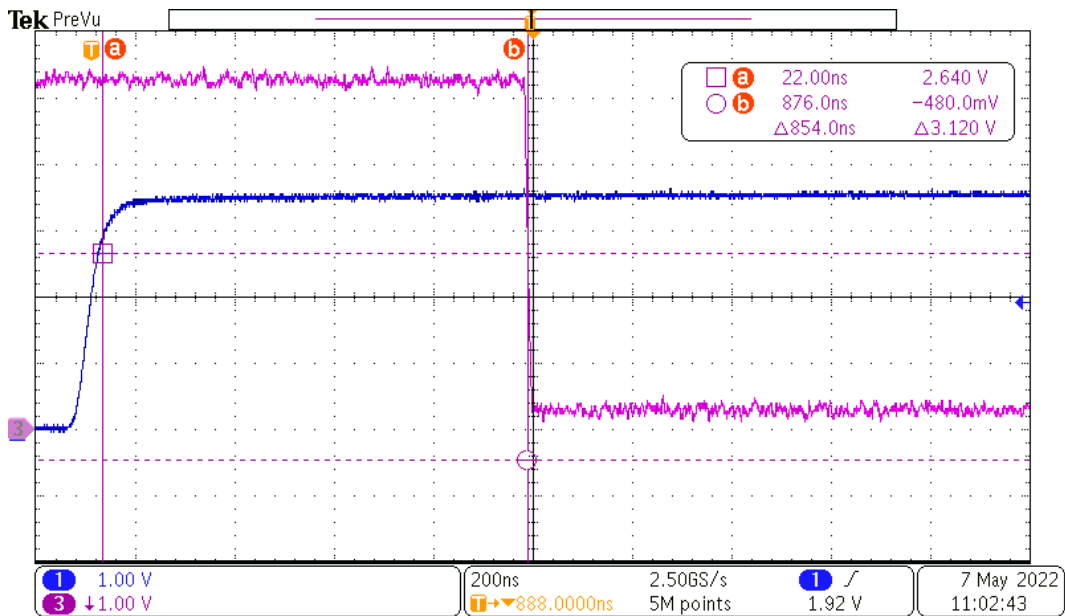
Měření dopravního zpoždění by nemělo být problematické, v souladu s teoretickou částí a katalogovými hodnotami je očekáváno, že optický oddělovač by měl mít zpoždění nejdelší, a také rozdílně dlouhé časy pro zapínání a vypínání. Induktivní a kapacitní oddělovače by měly mít zpoždění podobné, řádově menší než optický oddělovač, a podobné při zapínání i vypínání.

Pro dosažení vysokých strmostí napětí při měření CMTI je nezbytné potlačení parazitních parametrů plošného spoje, což je problematické už z provedení přípravku pro měření několika oddělovačů na jednom plošném spoji, kdy nezbytná délka cest může být příliš velká – mít velkou indukčnost, a tedy utlumit hrany. Nejnižší odolnost je očekávána u optického oddělovače, největší naopak u kapacitního oddělovače ISO 7721, který by měl v ideálním případě sloužit jako reference.

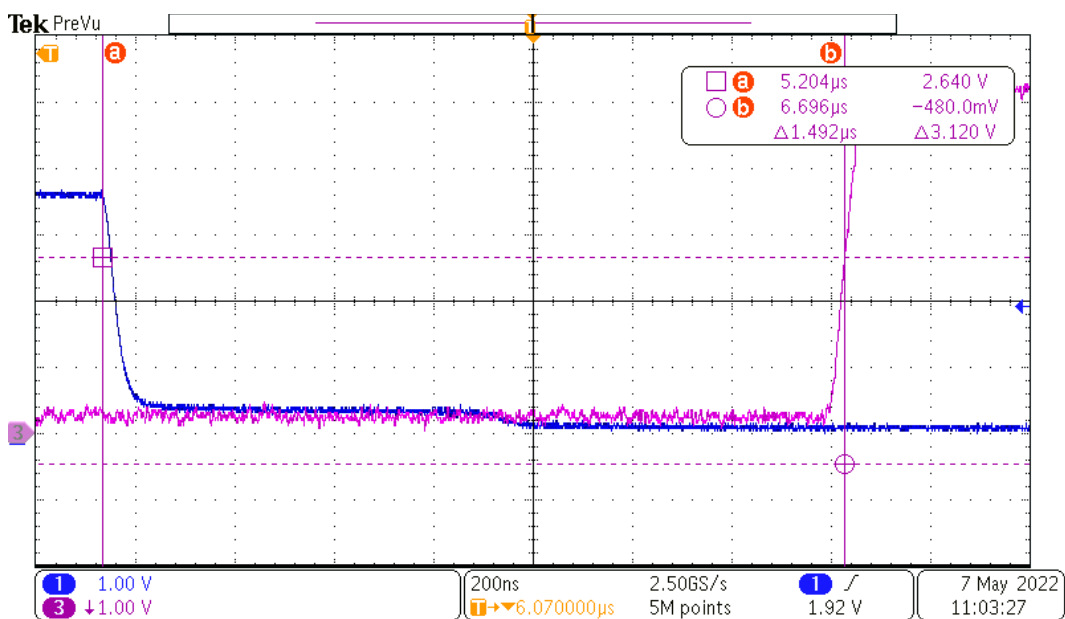
4.6 Měření dopravního zpoždění

4.6.1 Optické oddělení – H11L1V

Mezní katalogový čas zapnutí i čas vypnutí je 3,8 μs . Změřené zpoždění při náběžné hraně je 0,854 μs a při sestupné 1,5 μs . Vlivem velkého vstupního proudu (cca 10 mA) došlo ke snížení vstupního napětí dodávaného MLC-interfacem. Proti poklesu napětí nepomohlo ani zvýšení předřadného rezistoru na hodnotu 1 $\text{k}\Omega$, a tedy snížení vstupního proudu na cca 4 mA. Při této konfiguraci obvodu bylo vstupní napětí stále sniženo jen na cca 3,5 V (reálný vstupní proud byl tedy 2,3 mA).



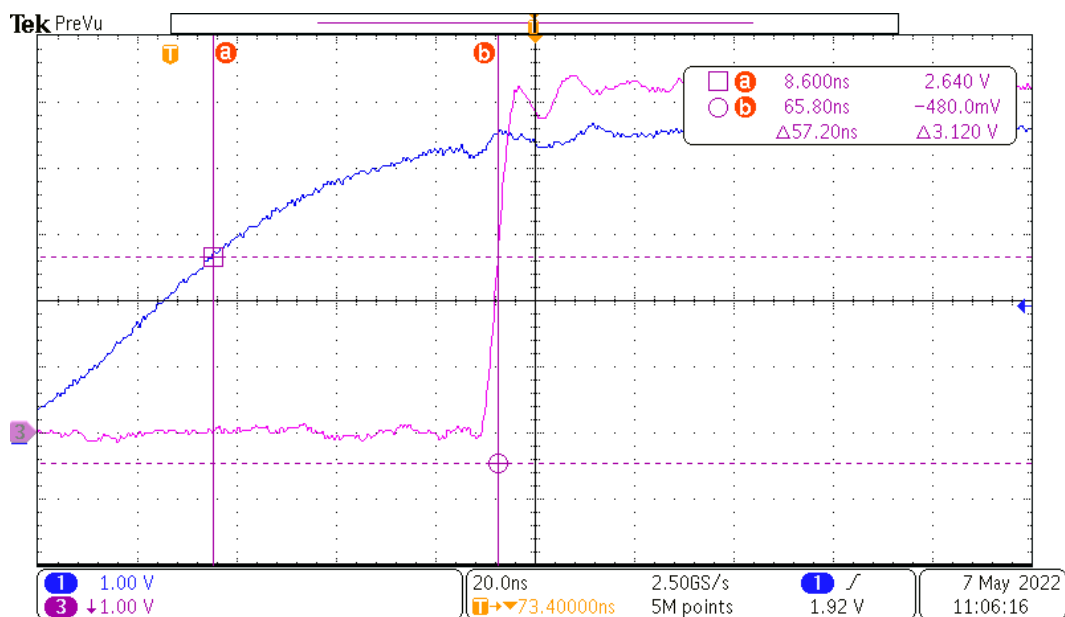
Obr. 17: Změřená náběžná hrana, kanál 1 (modrý) – vstupní signál, kanál 3 (fialový) – výstupní signál



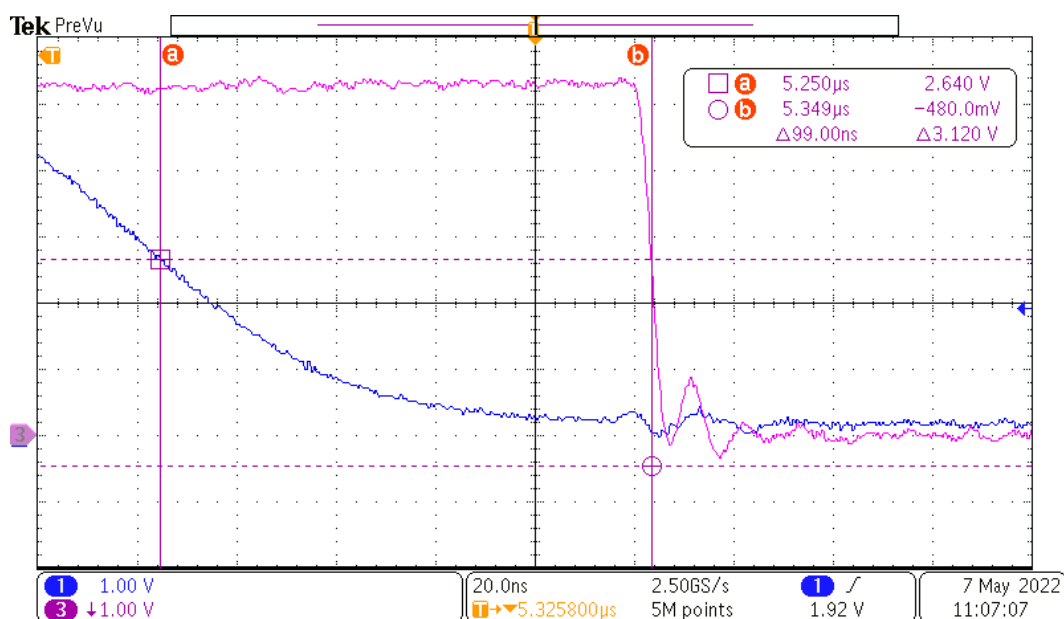
Obr. 18: Změřená sestupná hrana, kanál 1 (modrý) – vstupní signál, kanál 3 (fialový) – výstupní signál

4.6.2 Induktivní oddělení – ADuM1301

Katalogový rozsah dopravního zpoždění je 50 až 100 ns, typické zpoždění 65 ns. Změřené dopravní zpoždění je 57,2 ns při náběžné hraně a 99 ns při sestupné hraně.



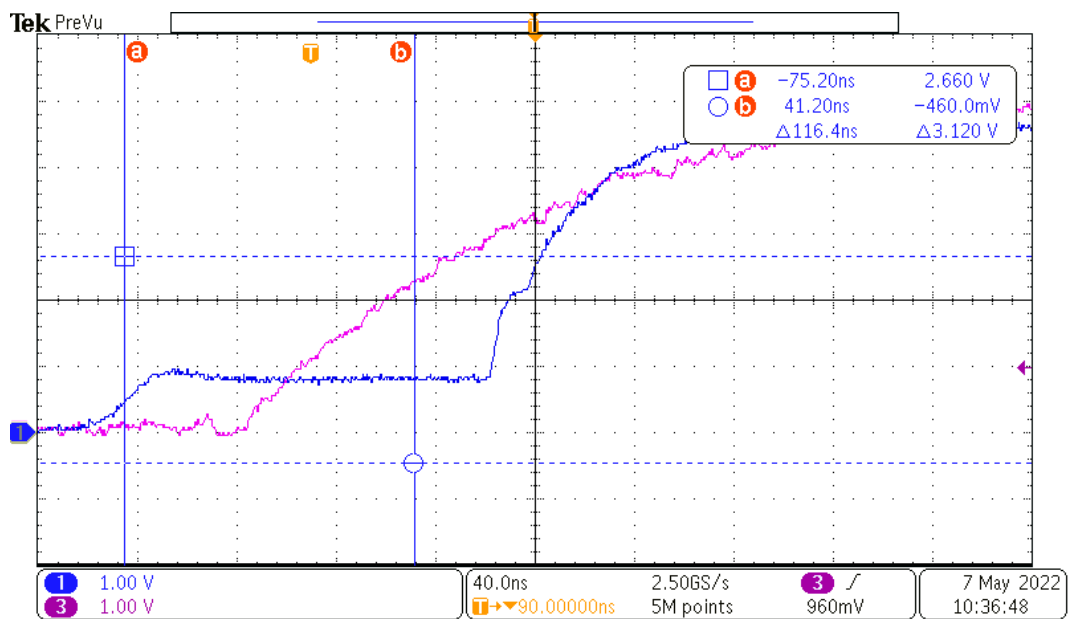
Obr. 19: Změřená náběžná hrana, kanál 1 (modrý) – vstupní signál, kanál 3 (fialový) – výstupní signál



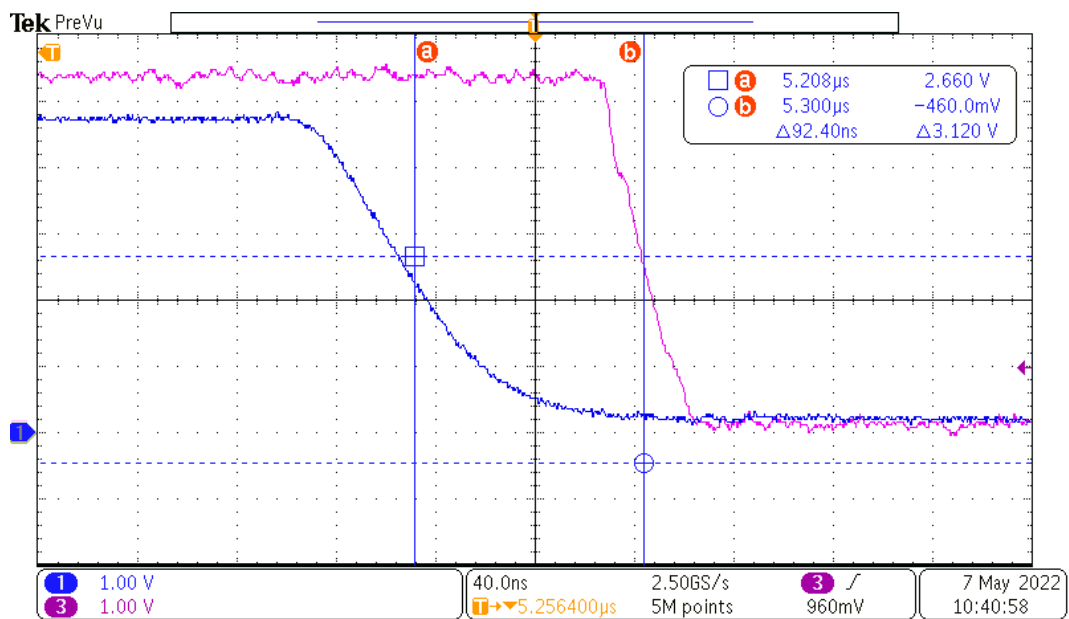
Obr. 20: Změřená sestupná hrana, kanál 1 (modrý) – vstupní signál, kanál 3 (fialový) – výstupní signál

4.6.3 Kapacitní oddělení – ISO1540DR

Katalogové dopravní zpoždění je při přechodu L>H typicky 31 ns, maximálně 62 ns; při přechodu H>L typicky 70 ns a maximálně 139 ns. Změřená dopravní zpoždění jsou 116 ns při náběžné hraně a 92 ns při sestupné hraně. Delší zpoždění může být dáno výstupní kapacitou 33 pF, která může způsobovat delší rozhodování o směru přenosu, katalogové údaje platí při výstupní kapacitě 10 pF.



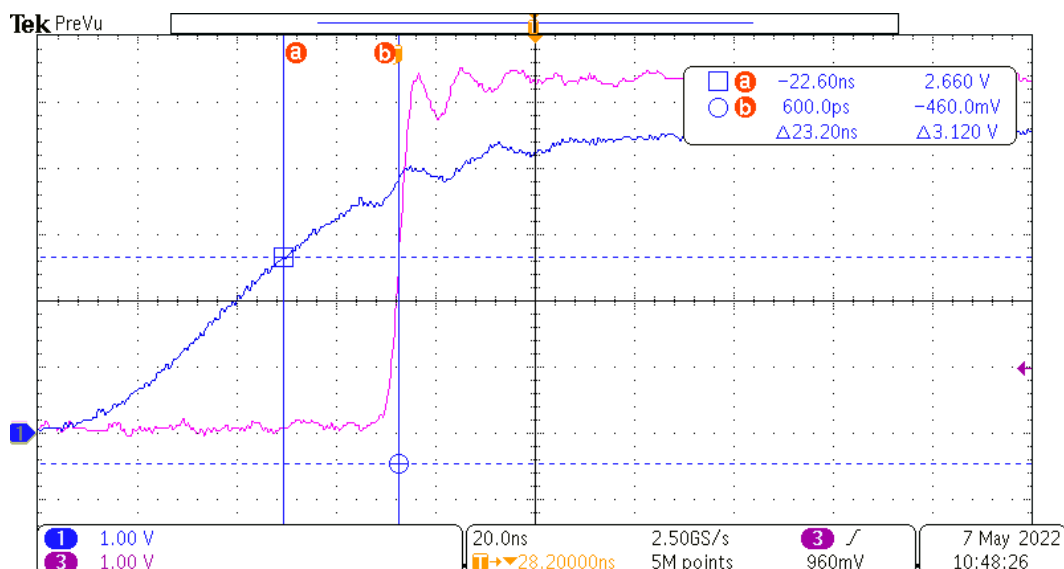
Obr. 21: Změřená náběžná hrana, kanál 1 (modrý) – vstupní signál, kanál 3 (fialový) – výstupní signál. Plošina na úrovni 1 V je dána obousměrností komunikace I2C – logika rozhoduje, kterým směrem přenášet data, katalogová délka plošiny je 110 ns



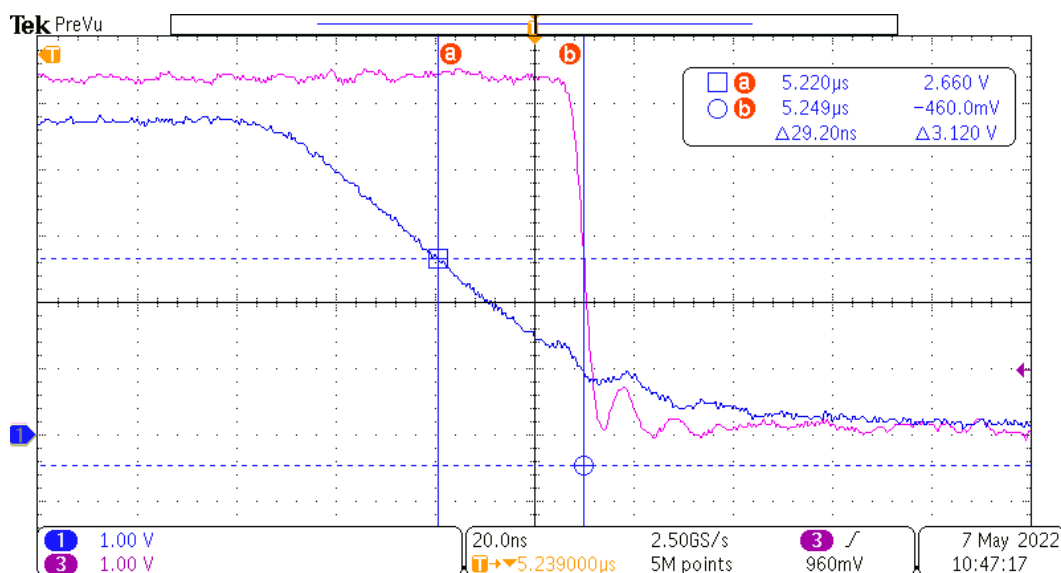
Obr. 22: Změřená sestupná hrana, kanál 1 (modrý) – vstupní signál, kanál 3 (fialový) – výstupní signál

4.6.4 Kapacitní oddělení – ISO7721

Katalogové zpoždění je 6 až 16 ns, typické 11 ns, změřené je 23 ns při náběžné hraně a 29 ns při sestupné.



Obr. 23: Změřená náběžná hrana, kanál 1 (modrý) – vstupní signál, kanál 3 (fialový) – výstupní signál



Obr. 24: Změřená sestupná hrana, kanál 1 (modrý) – vstupní signál, kanál 3 (fialový) – výstupní signál

4.6.5 Zhodnocení měření dopravního zpoždění

Optický oddělovač má největší dopravní zpoždění a rozdílnou délku zpoždění pro náběžnou a sestupnou hranu. Měření zpoždění rychlých oddělovačů je ovlivněno malou strmostí napětí dodanou MLC-interfacem – při malé strmosti napětí malá nepřesnost při odečtu rozhodovací úrovně odpovídá velké chybě času.

4.7 Měření CMTI

Měření provedeno pro několik velikostí strmosti napětí, pro náběžnou i sestupnou hranu a pro vstupní logickou úroveň H i L. Byl zjišťován maximální výkyv výstupního napětí.

Strmost napětí mezi stranami oddělení je určena napětím zdroje „U₃₀“ pro nabíjení indukčnosti (ve schématu jako „U“), zvoleno konstantní 30 V, dobou sepnutí tranzistoru – dobou naproudění indukčnosti „T_{ON}“ (40 μs), indukčností (14,4 μH) a napětím napěťového omezení – U_{DC} (ve schématu jako „400“), které bylo nastavováno v rozsahu 100 až 400 V, čemuž odpovídala výsledná strmost 10 až 25 kV/μs. Vyšší strmosti se nepodařilo dosáhnout ani při experimentování s časem sepnutí, a tedy proudem indukčností. Strmost napětí je podle [19] dána jako:

$$\frac{dV_{CM}}{dt} = \frac{V_{Chg} * T_{ON}}{L_f * (C_{OSS} + C_D)} \quad 1.$$

Tedy:

$$Strmost = \frac{U_{30} * T_{ON}}{L * (C_{DS} + C_D)} \quad 2.$$

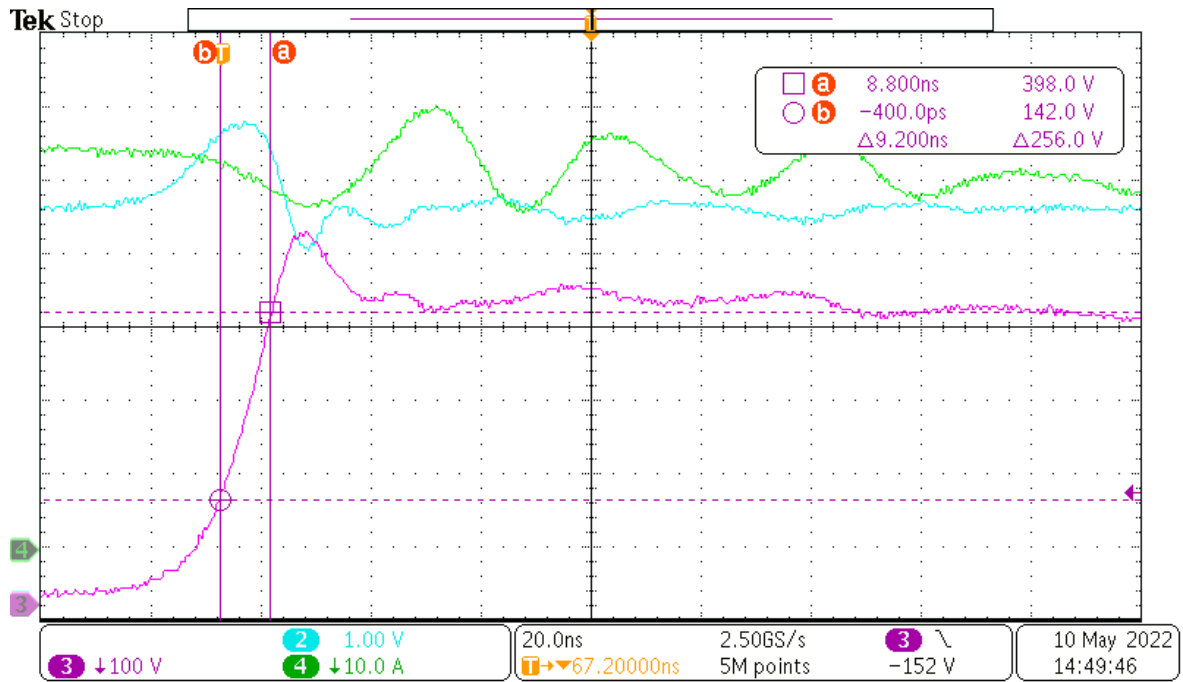
4.7.1 Optické oddělení – H11L1V

Tab. 5: Změřené hodnoty pro optické oddělení pro náběžnou hranu

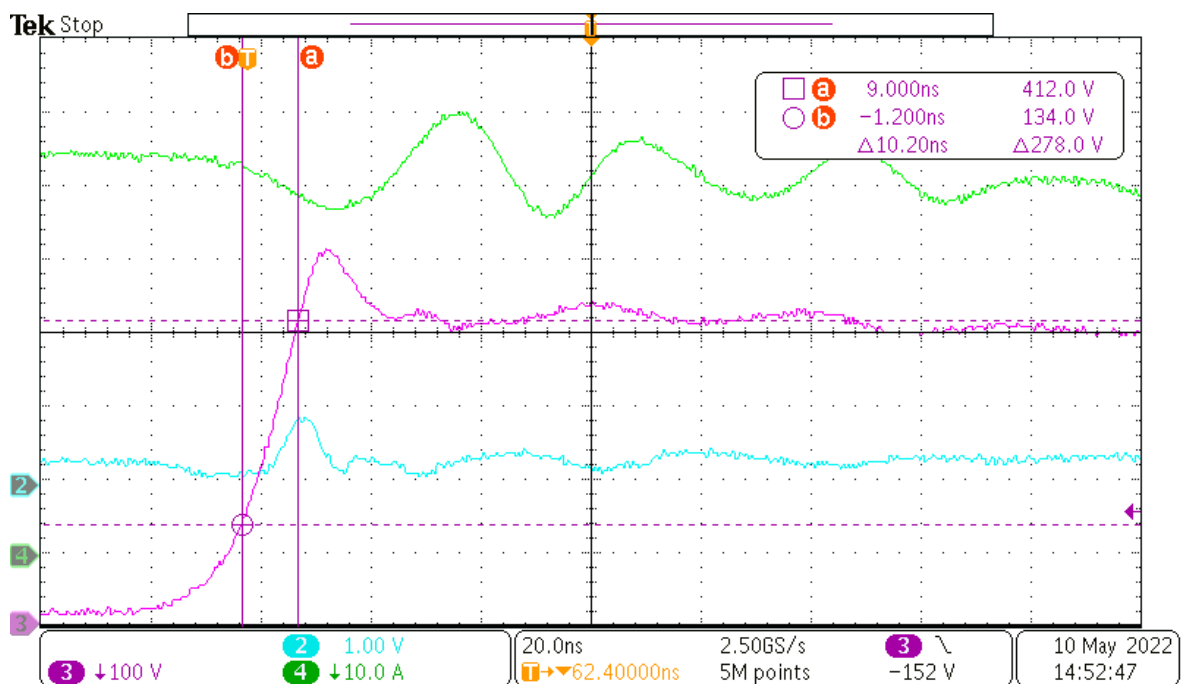
Vstup	U ₃₀ (V)	U _{DC} (V)	T _{ON} (μs)	ΔU (V)	Δt (ns)	Strmost (kV/μs)	Výkyv (V)
H	30	100	40	79,5	8,6	9,2	0,8
H	30	200	40	141	9,0	15,7	0,6
H	30	300	40	221	10,4	21,3	0,8
H	30	400	40	278	10,2	27,3	0,8
L	30	100	40	85	9,0	9,4	1,0
L	30	200	40	145	8,6	16,9	1,0
L	30	300	40	223	10,4	21,4	1,3
L	30	400	40	256	9,2	27,8	1,3

Tab. 6: Změřené hodnoty pro optické oddělení pro sestupnou hranu

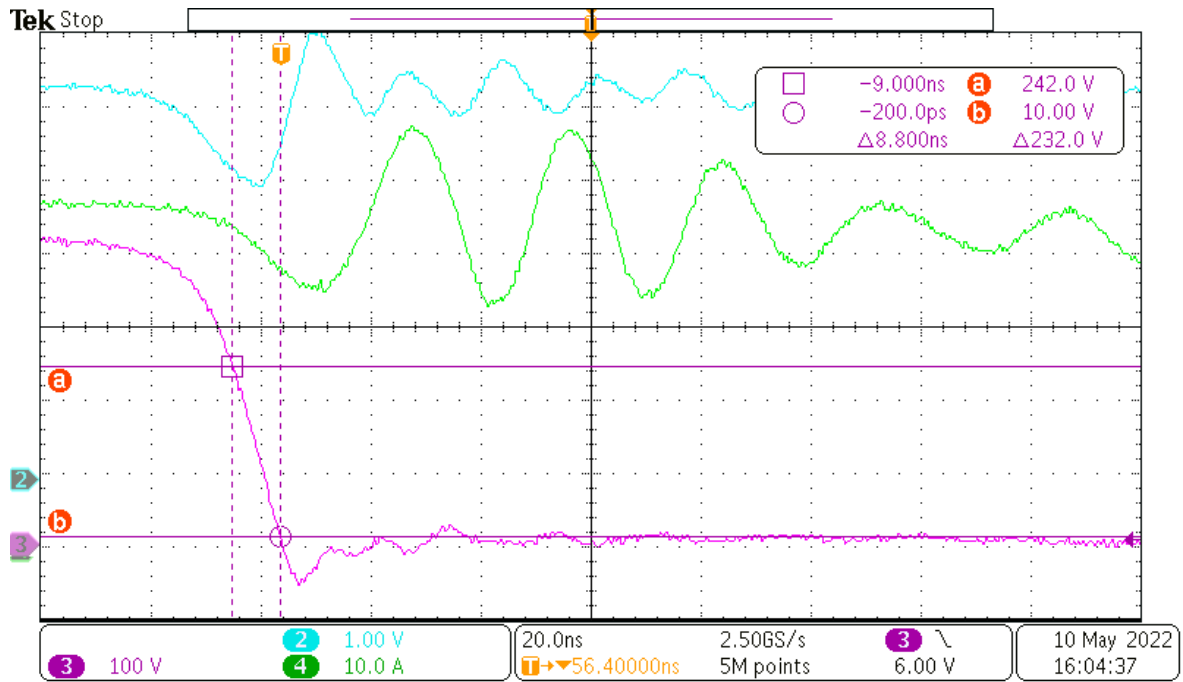
Vstup	U ₃₀ (V)	U _{DC} (V)	T _{ON} (μs)	ΔU (V)	Δt (ns)	Strmost (kV/μs)	Výkyv (V)
H	30	100	40	70	7,6	9,2	-0,2
H	30	200	40	112	6,8	16,5	-0,4
H	30	300	40	193	8,8	21,9	-0,4
H	30	400	40	238	8,8	27,0	-0,4
L	30	100	40	70,5	7,0	10,1	-0,4
L	30	200	40	121	6,4	18,9	-0,8
L	30	300	40	199	8,8	22,6	-1,1
L	30	400	40	232	8,8	26,4	-1,2



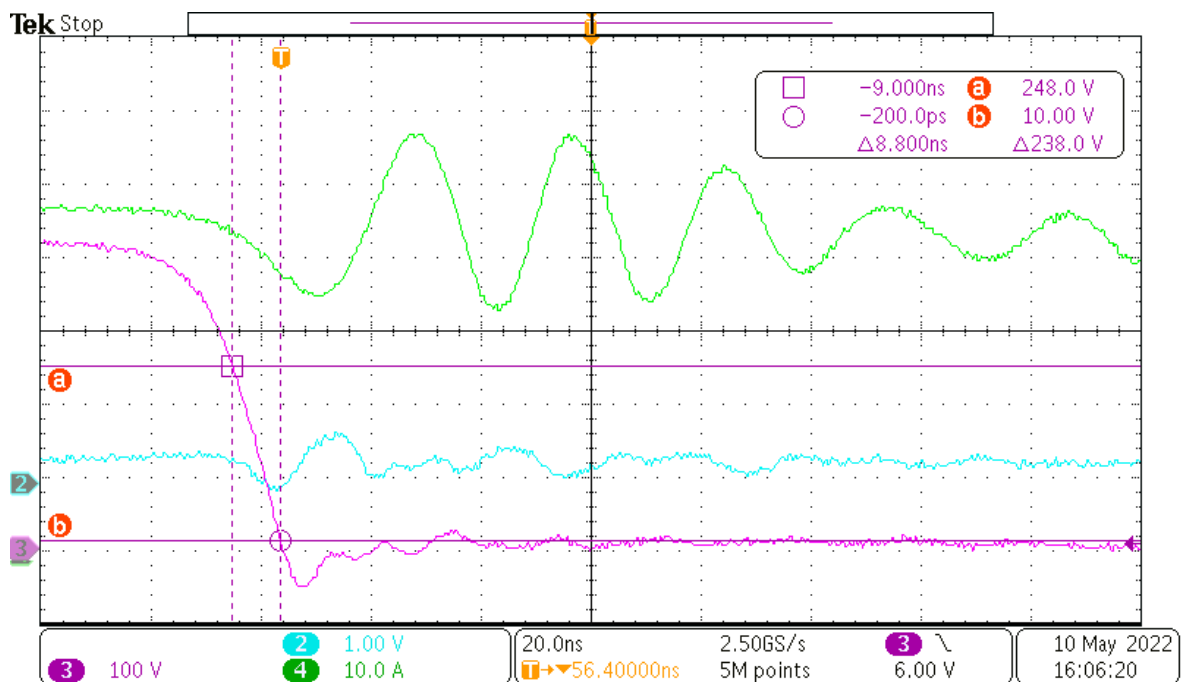
Obr. 25: Změřené průběhy pro optické oddělení; náběžnou hranu; $U_{DC} = 400\text{ V}$ a vstupní úroveň L (oddělovač invertuje – výstupní úroveň je H). Kanál 2 (azurová) – výstupní napětí, kanál 3 (fialová) – strmost napětí, kanál 4 (zelená) – proud indukčnosti



Obr. 26: Změřené průběhy pro optické oddělení; náběžnou hranu; $U_{DC} = 400\text{ V}$ a vstupní úroveň H (oddělovač invertuje – výstupní úroveň je L). Kanál 2 (azurová) – výstupní napětí, kanál 3 (fialová) – strmost napětí, kanál 4 (zelená) – proud indukčnosti



Obr. 27: Změřené průběhy pro optické oddělení; sestupnou hranu; $U_{DC} = 400\text{ V}$ a vstupní úroveň L (oddělovač invertuje – výstupní úroveň je H). Kanál 2 (azurová) – výstupní napětí, kanál 3 (fialová) – strmost napětí, kanál 4 (zelená) – proud indukčnosti



Obr. 28: Změřené průběhy pro optické oddělení; sestupnou hranu; $U_{DC} = 400\text{ V}$ a vstupní úroveň H (oddělovač invertuje – výstupní úroveň je L). Kanál 2 (azurová) – výstupní napětí, kanál 3 (fialová) – strmost napětí, kanál 4 (zelená) – proud indukčnosti

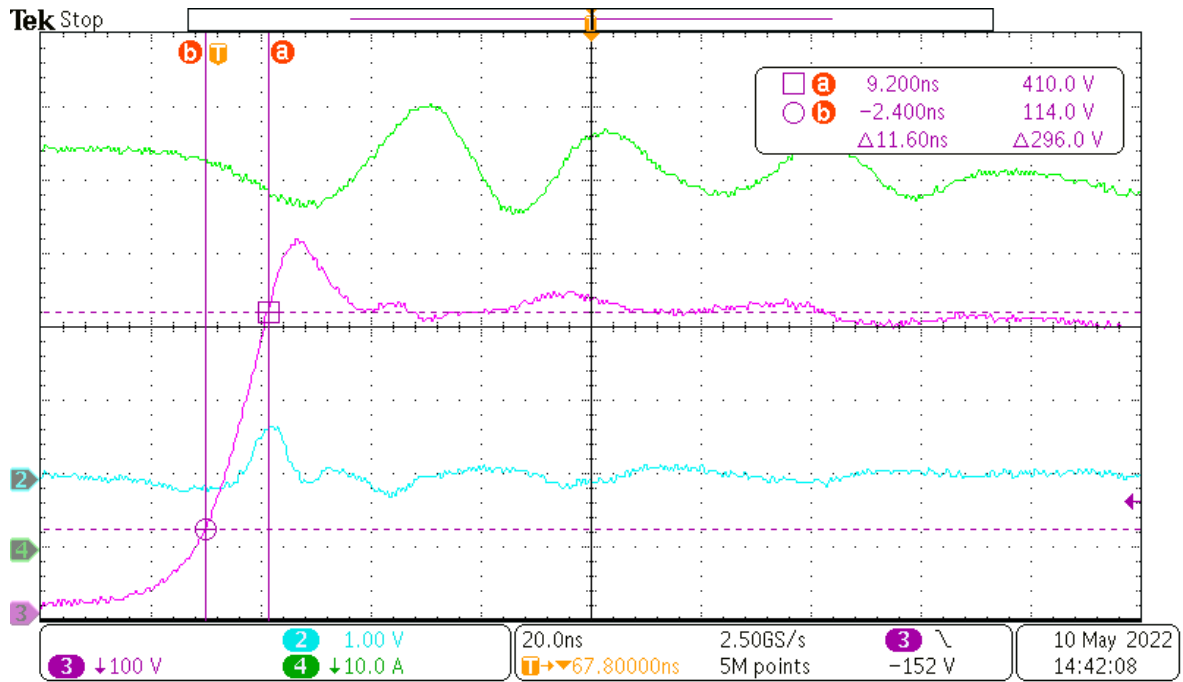
4.7.2 Induktivní oddělení – ADuM1301

Tab. 7: Změřené hodnoty pro induktivní oddělení pro náběžnou hranu

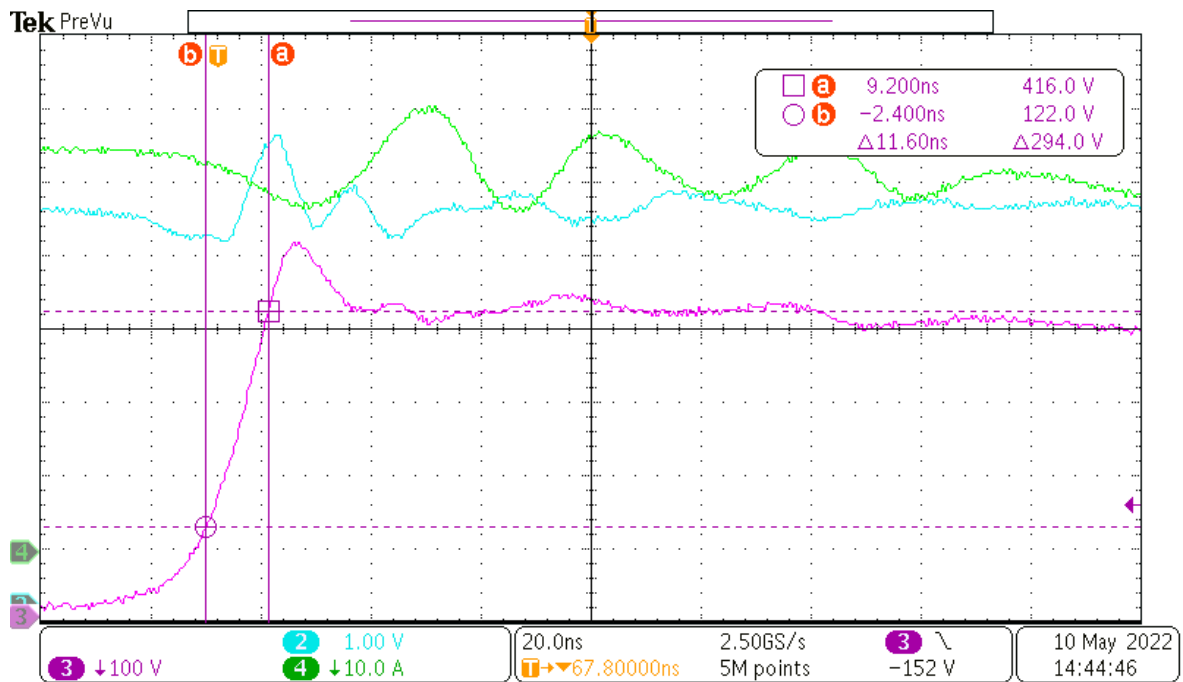
Vstup	U_{30} (V)	U_{DC} (V)	T_{ON} (μ s)	ΔU (V)	Δt (ns)	Strmost (kV/ μ s)	Výkyv (V)
H	30	100	40	80,5	8,0	10,1	0,8
H	30	200	40	155	11,2	13,8	0,7
H	30	300	40	238	10,4	22,9	1,2
H	30	400	40	294	11,6	25,3	1,3
L	30	100	40	81	8,2	9,9	0,5
L	30	200	40	159	9,6	16,6	0,5
L	30	300	40	208	9,2	22,6	0,6
L	30	400	40	296	11,6	25,5	0,7

Tab. 8: Změřené hodnoty pro induktivní oddělení pro sestupnou hranu

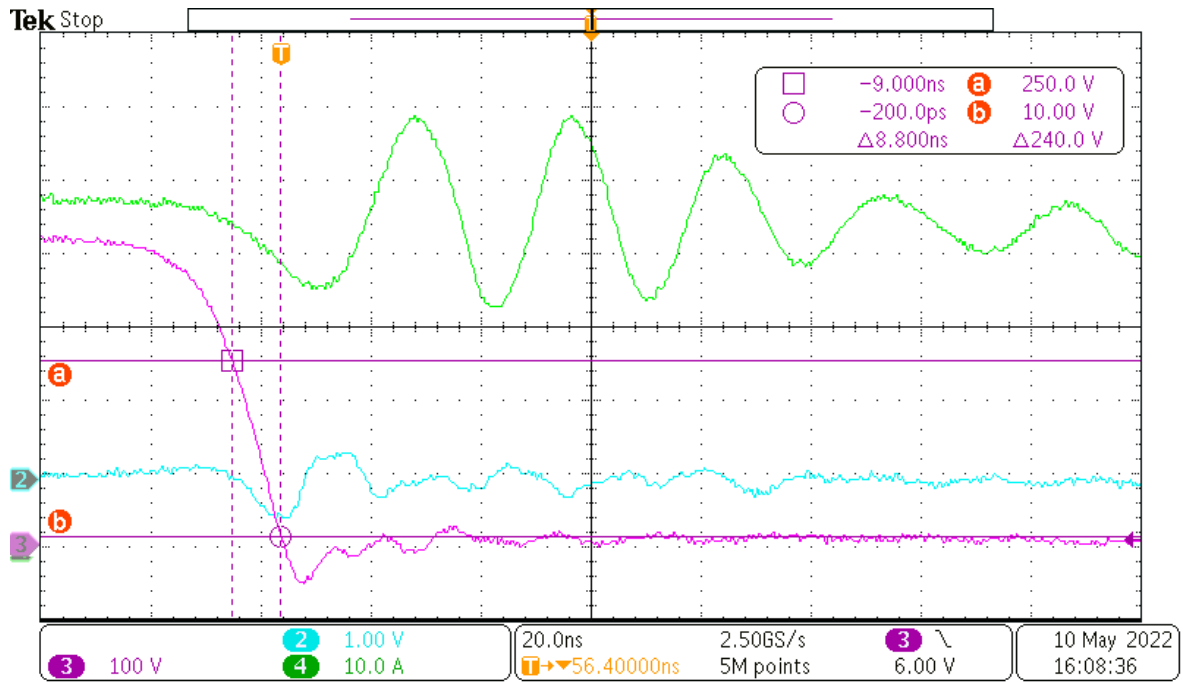
Vstup	U_{30} (V)	U_{DC} (V)	T_{ON} (μ s)	ΔU (V)	Δt (ns)	Strmost (kV/ μ s)	Výkyv (V)
H	30	100	40	70	7,0	10,0	-0,4
H	30	200	40	149	9,6	15,5	-0,8
H	30	300	40	197	8,8	22,4	-0,8
H	30	400	40	240	8,8	27,3	-0,8
L	30	100	40	63	6,6	9,5	-0,4
L	30	200	40	112	6,2	18,1	-0,5
L	30	300	40	197	8,8	22,4	-0,5
L	30	400	40	240	8,8	27,3	-0,6



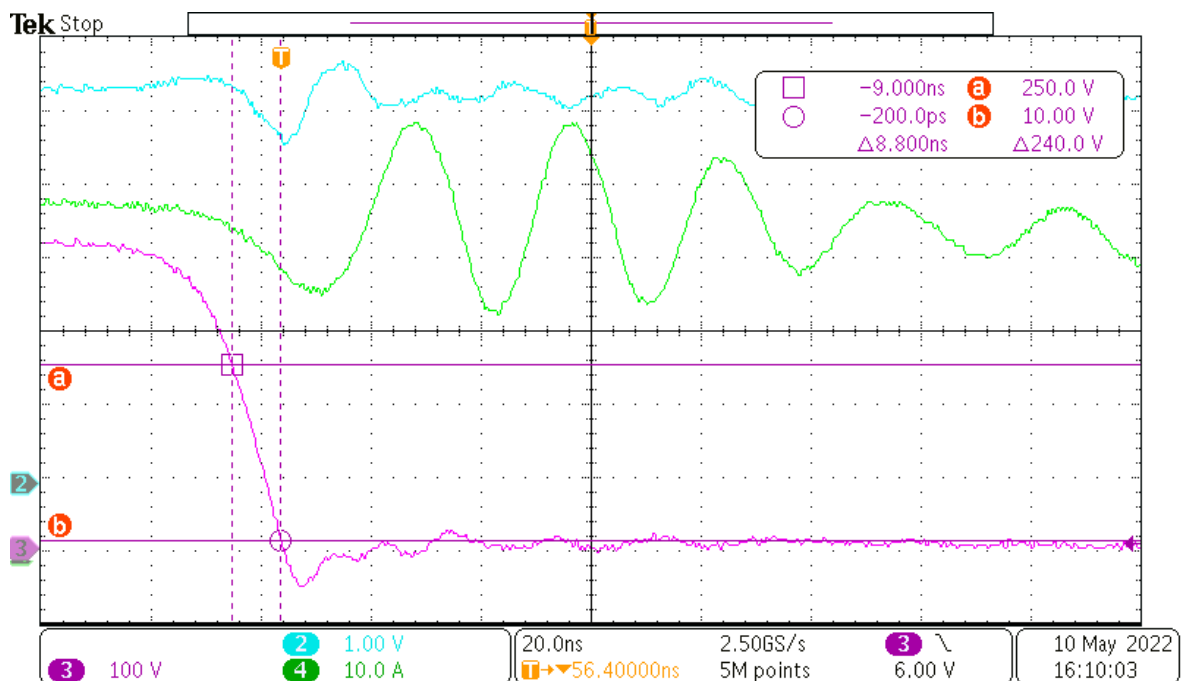
Obr. 29: Změřené průběhy pro induktivní oddělení; náběžnou hranu; $U_{DC} = 400 \text{ V}$ a vstupní úroveň L .
 Kanál 2 (azurová) – výstupní napětí, kanál 3 (fialová) – strmost napětí, kanál 4 (zelená) – proud indukčnosti



Obr. 30: Změřené průběhy pro induktivní oddělení; náběžnou hranu; $U_{DC} = 400 \text{ V}$ a vstupní úroveň H .
 Kanál 2 (azurová) – výstupní napětí, kanál 3 (fialová) – strmost napětí, kanál 4 (zelená) – proud indukčnosti



Obr. 31: Změřené průběhy pro indukční oddělení; sestupnou hranu; $U_{DC} = 400\text{ V}$ a vstupní úroveň L. Kanál 2 (azurová) – výstupní napětí, kanál 3 (fialová) – strmost napětí, kanál 4 (zelená) – proud indukčnosti



Obr. 32: Změřené průběhy pro indukční oddělení; sestupnou hranu; $U_{DC} = 400\text{ V}$ a vstupní úroveň H. Kanál 2 (azurová) – výstupní napětí, kanál 3 (fialová) – strmost napětí, kanál 4 (zelená) – proud indukčnosti

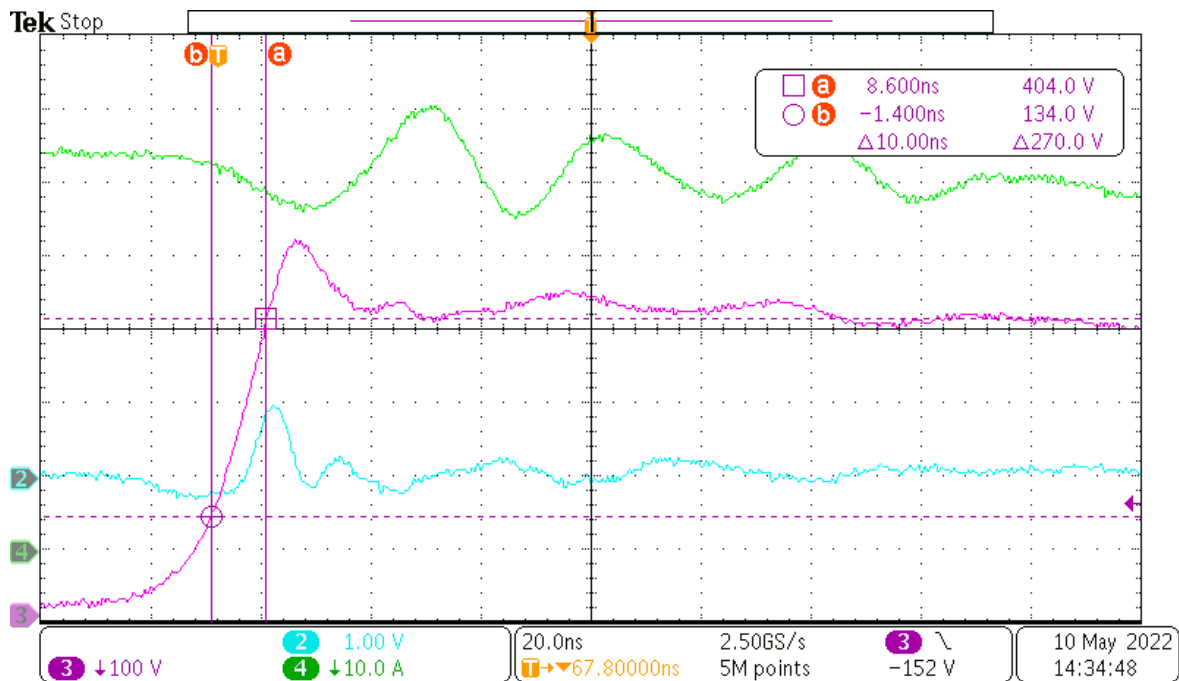
4.7.3 Kapacitní oddělení – ISO1540DR

Tab. 9: Změřené hodnoty pro kapacitní oddělení ISO1540 pro náběžnou hranu

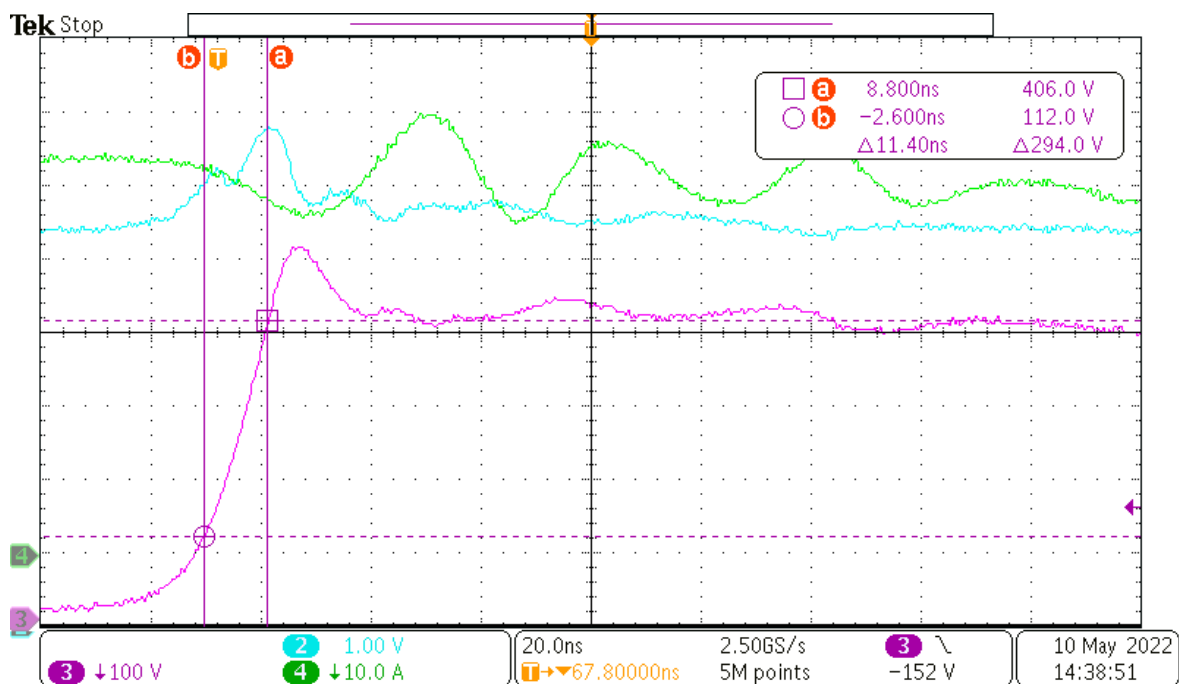
Vstup	U ₃₀ (V)	U _{DC} (V)	T _{ON} (μs)	ΔU (V)	Δt (ns)	Strmost (kV/μs)	Výkyv (V)
H	30	100	40	83,5	8,4	9,9	1,0
H	30	200	40	141	8,6	16,4	1,0
H	30	300	40	206	9,8	21,0	1,2
H	30	400	40	294	11,4	25,8	1,4
L	30	100	40	85,5	9,0	9,5	0,8
L	30	200	40	139	8,0	17,4	0,4
L	30	300	40	237	12,0	19,8	0,6
L	30	400	40	270	10,0	27,0	1,0

Tab. 10: Změřené hodnoty pro kapacitní oddělení ISO1540 pro sestupnou hranu

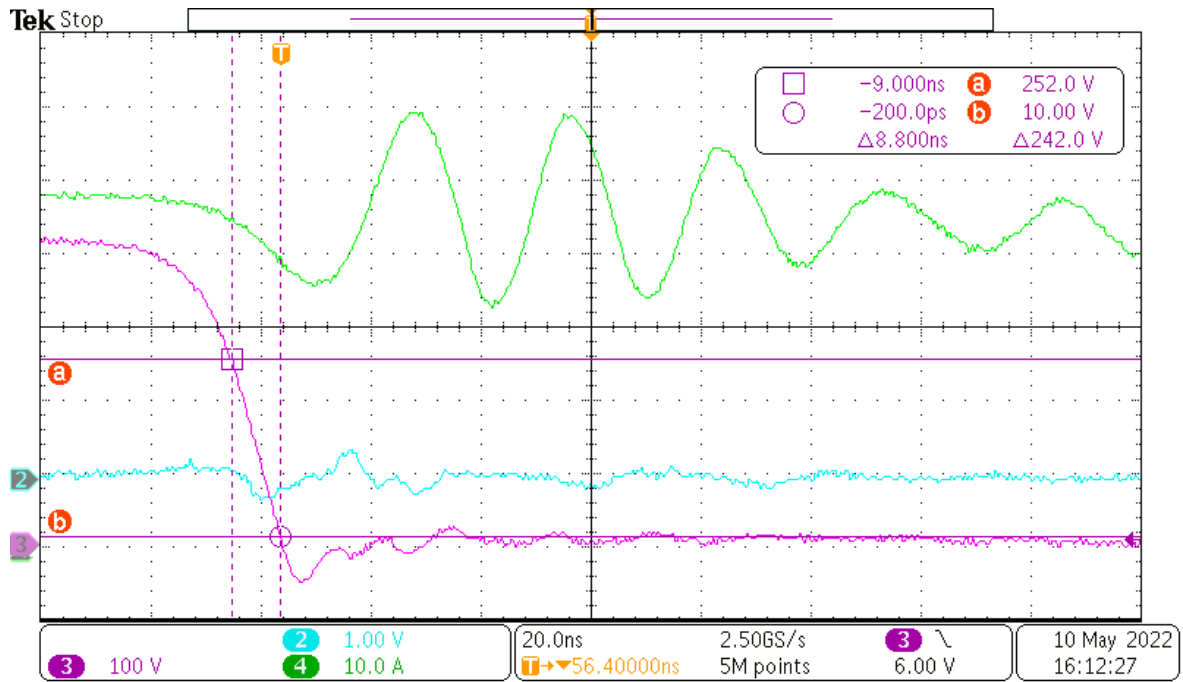
Vstup	U ₃₀ (V)	U _{DC} (V)	T _{ON} (μs)	ΔU (V)	Δt (ns)	Strmost (kV/μs)	
H	30	100	40	69	7,2	9,6	-0,4
H	30	200	40	117	6,4	18,3	-0,8
H	30	300	40	197	8,8	22,4	-1,0
H	30	400	40	244	8,8	27,7	-1,2
L	30	100	40	63	6,6	9,5	-0,2
L	30	200	40	131	7,6	17,2	-0,2
L	30	300	40	194	8,8	22,0	-0,2
L	30	400	40	242	8,8	27,5	-0,4



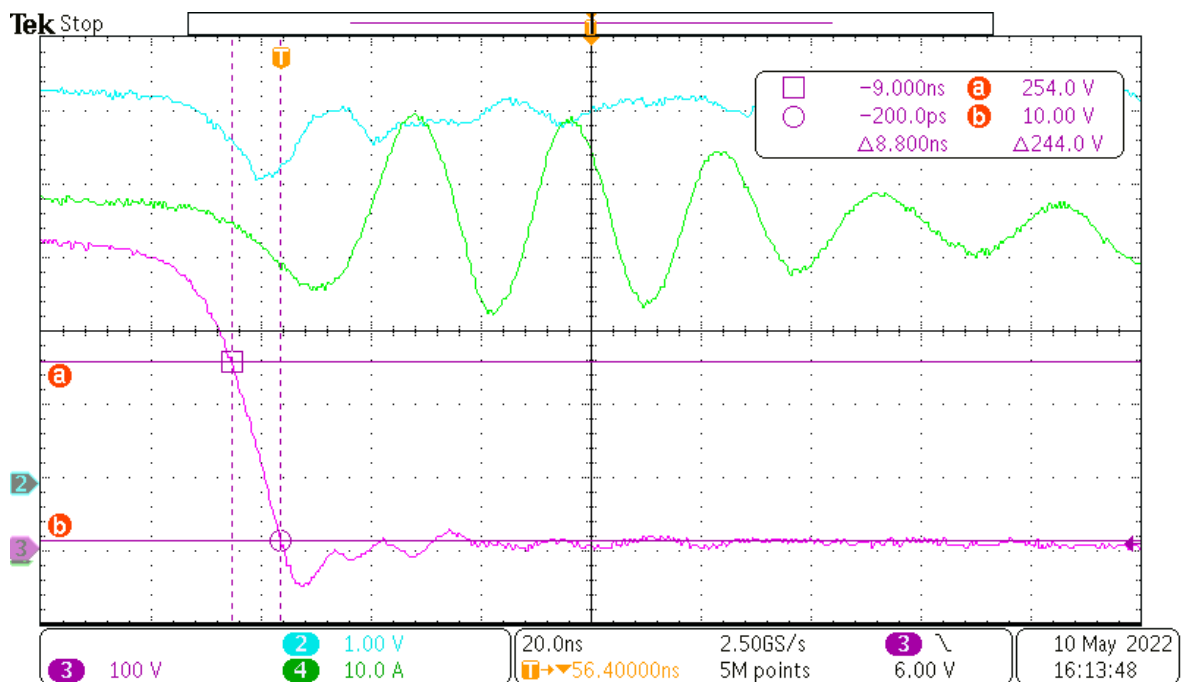
Obr. 33: Změřené průběhy pro kapacitní oddělení ISO1540; náběžnou hranu; $U_{DC} = 400\text{ V}$ a vstupní úroveň L. Kanál 2 (azurová) – výstupní napětí, kanál 3 (fialová) – strmost napětí, kanál 4 (zelená) – proud indukčnosti



Obr. 34: Změřené průběhy pro kapacitní oddělení ISO1540; náběžnou hranu; $U_{DC} = 400\text{ V}$ a vstupní úroveň H. Kanál 2 (azurová) – výstupní napětí, kanál 3 (fialová) – strmost napětí, kanál 4 (zelená) – proud indukčnosti



Obr. 35: Změřené průběhy pro kapacitní oddělení ISO1540; sestupnou hranu; $U_{DC} = 400\text{ V}$ a vstupní úroveň L. Kanál 2 (azurová) – výstupní napětí, kanál 3 (fialová) – strmost napětí, kanál 4 (zelená) – proud indukčnosti



Obr. 36: Změřené průběhy pro kapacitní oddělení ISO1540; sestupnou hranu; $U_{DC} = 400\text{ V}$ a vstupní úroveň H. Kanál 2 (azurová) – výstupní napětí, kanál 3 (fialová) – strmost napětí, kanál 4 (zelená) – proud indukčnosti

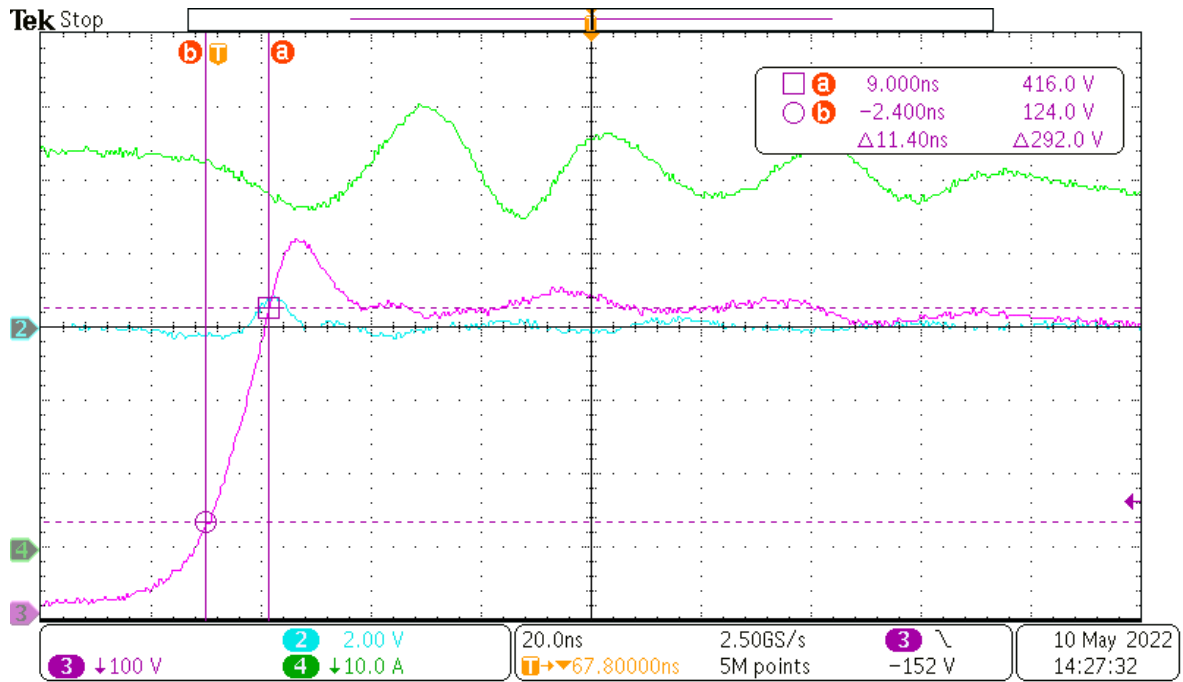
4.7.4 Kapacitní oddělení – ISO7721

Tab. 11: Změřené hodnoty pro kapacitní oddělení ISO7721 pro náběžnou hranu

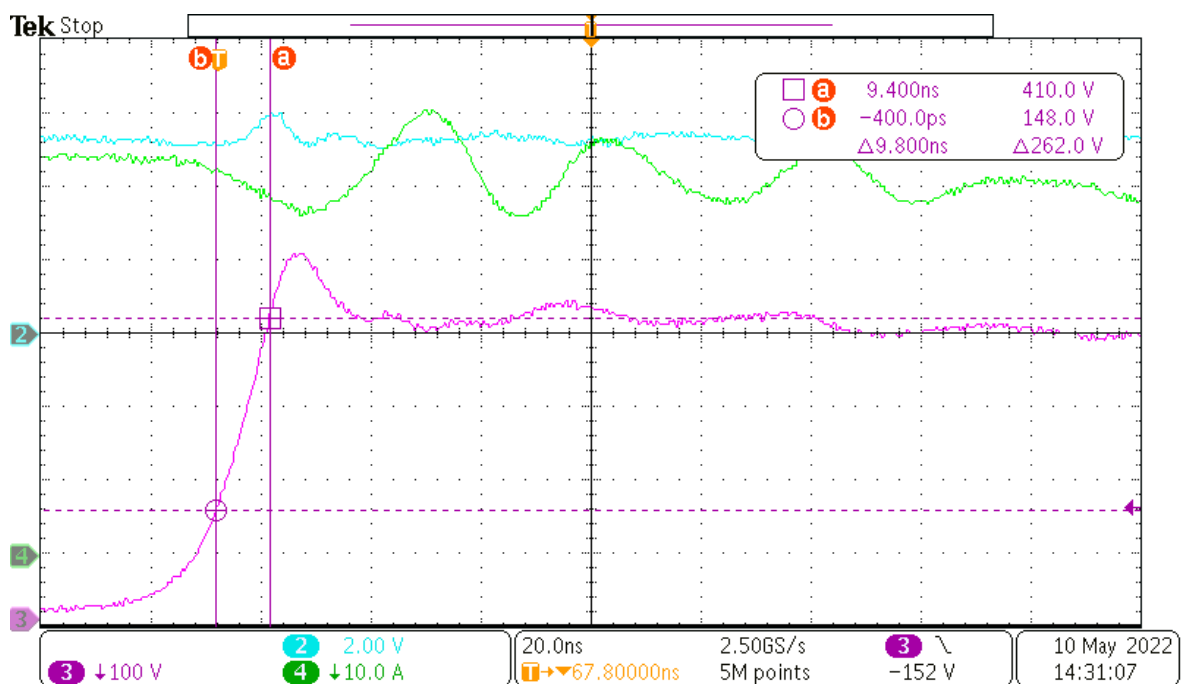
Vstup	U ₃₀ (V)	U _{DC} (V)	T _{ON} (μs)	ΔU (V)	Δt (ns)	Strmost (kV/μs)	Vstup
H	30	100	40	84	8,4	10,0	0,8
H	30	200	40	134	7,8	17,2	0,5
H	30	300	40	224	9,6	23,3	0,8
H	30	400	40	262	9,8	26,7	0,8
L	30	100	40	86,5	9,2	9,4	0,8
L	30	200	40	181	11,0	16,5	0,5
L	30	300	40	221	10,0	22,1	0,8
L	30	400	40	292	11,4	25,6	0,8

Tab. 12: Změřené hodnoty pro kapacitní oddělení ISO7721 pro sestupnou hranu

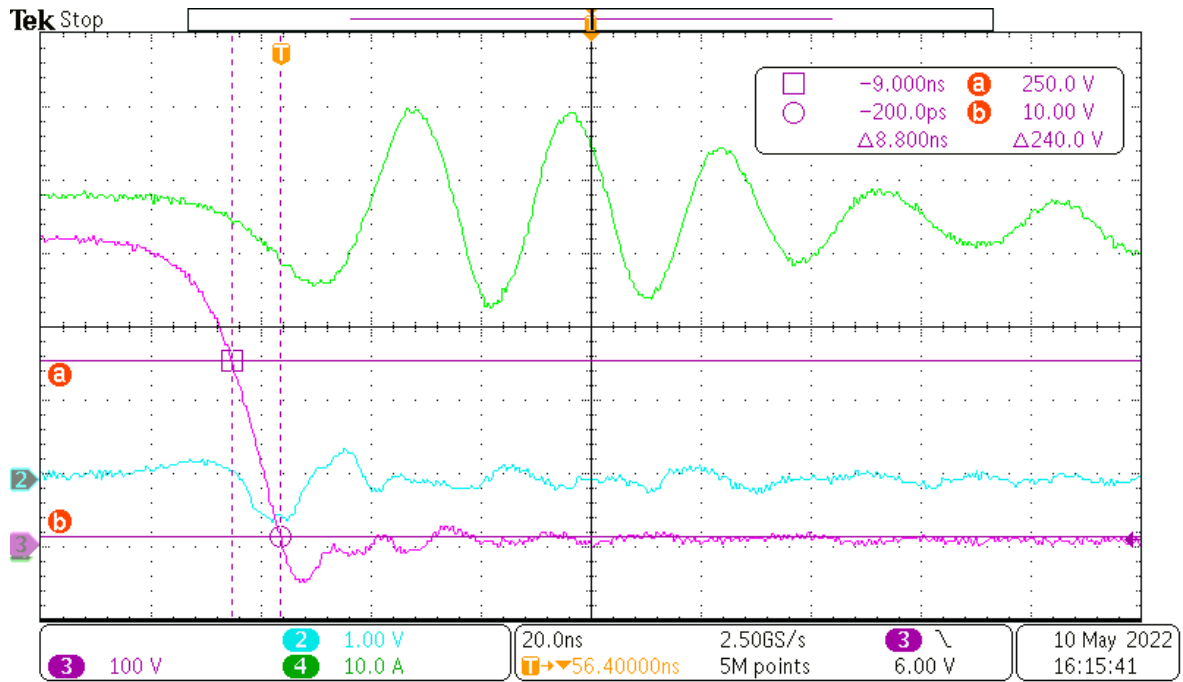
Vstup	U ₃₀ (V)	U _{DC} (V)	T _{ON} (μs)	ΔU (V)	Δt (ns)	Strmost (kV/μs)	Vstup
H	30	100	40	62,5	6,8	9,2	-0,4
H	30	200	40	116	6,4	18,1	-0,6
H	30	300	40	200	8,8	22,7	-0,7
H	30	400	40	246	8,8	28,0	-0,8
L	30	100	40	72,5	8,0	9,1	-0,4
L	30	200	40	122	7,0	17,4	-0,6
L	30	300	40	205	8,8	23,3	-0,6
L	30	400	40	240	8,8	27,3	-0,6



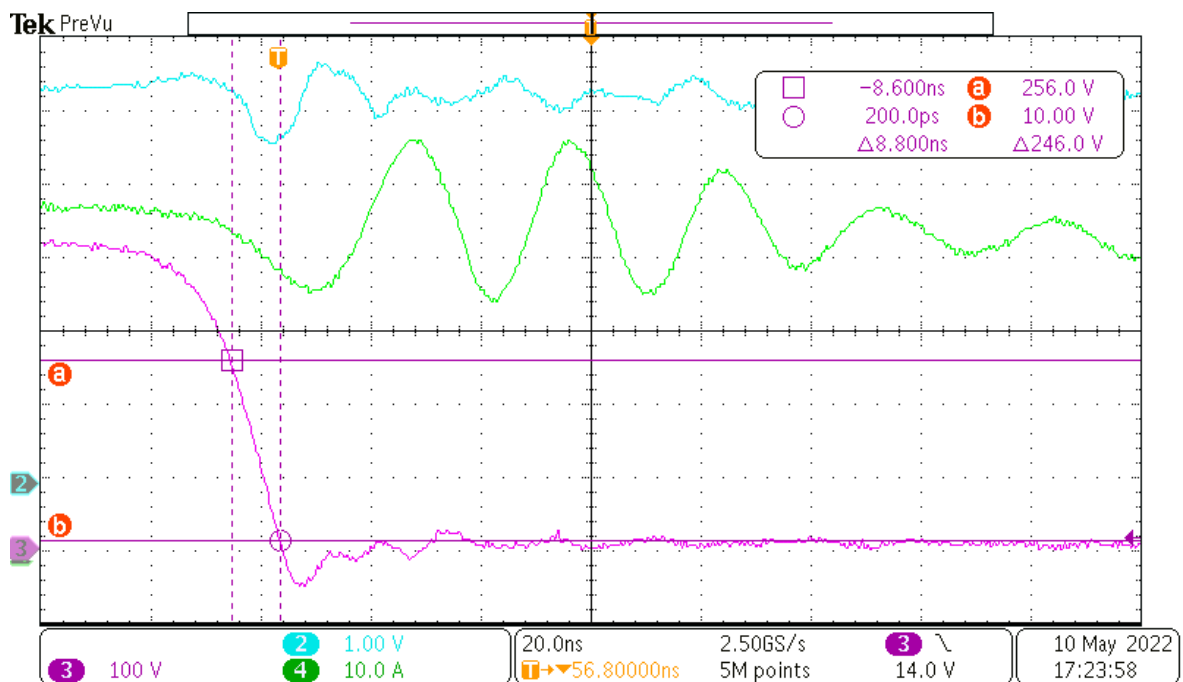
Obr. 37: Změřené průběhy pro kapacitní oddělení ISO7721; náběžnou hranu; $U_{DC} = 400\text{ V}$ a vstupní úroveň L. Kanál 2 (azurová) – výstupní napětí, kanál 3 (fialová) – strmost napětí, kanál 4 (zelená) – proud indukčnosti



Obr. 38: Změřené průběhy pro kapacitní oddělení ISO7721; náběžnou hranu; $U_{DC} = 400\text{ V}$ a vstupní úroveň H. Kanál 2 (azurová) – výstupní napětí, kanál 3 (fialová) – strmost napětí, kanál 4 (zelená) – proud indukčnosti



Obr. 39: Změřené průběhy pro kapacitní oddělení ISO7721; sestupnou hranu; $U_{DC} = 400\text{ V}$ a vstupní úroveň L. Kanál 2 (azurová) – výstupní napětí, kanál 3 (fialová) – strmost napětí, kanál 4 (zelená) – proud indukčnosti

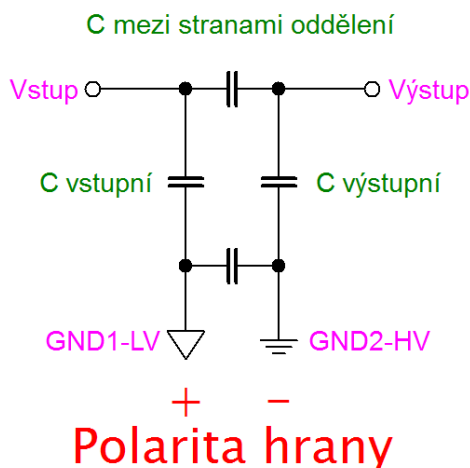


Obr. 40: Změřené průběhy pro kapacitní oddělení ISO7721; sestupnou hranu; $U_{DC} = 400\text{ V}$ a vstupní úroveň H. Kanál 2 (azurová) – výstupní napětí, kanál 3 (fialová) – strmost napětí, kanál 4 (zelená) – proud indukčnosti

4.7.5 Zhodnocení měření CMTI

Měřicí metoda má celkem velký „šum“, ale některé trendy jsou zřejmé:

- Optické a induktivní oddělení má větší zákmity než kapacitní oddělení – podle předpokladů, v souladu s teoretickou částí.
- Náběžná hrana způsobí výkyv výstupu do kladného napětí a sestupná hrana do záporného – podle zjednodušeného náhradního schématu:



Obr. 41: Náhradní schéma oddělovače při měření CMTI

Při náběžné hraně teče proud nabíjející kapacity z GND1-LV do GND2-HV přes spodní kapacitu mezi zeměmi oddělení, ale i sériovou kombinaci tří zbývajících kapacit, čímž nabíjí výstupní kapacitu, což krátkodobě zvýší její napětí. Při sestupné hraně teče proud naopak, čímž výstupní kapacitu vybíjí a způsobuje krátkodobý pokles jejího napětí.

Zhodnocení a závěr

Přestože principů používaných při galvanickém oddělení signálů není mnoho, oddělení je používáno ve velkém množství oborů. Proto byla vyvinuta široká škála různých typů oddělovačů, vždy přizpůsobených konkrétnímu použití.

Vzhledem k tomu, že jde o relativně nový a dynamicky se rozvíjející obor, ke kterému ještě není příliš dostupná literatura, která by obsahovala komplexní a hierarchický přehled všech používaných technologií, vychází teoretická část většinou jen z materiálů přímo výrobců (katalogy, záznamy konferencí, kde byla nová technologie představována apod.).

Měření dopravního zpoždění vyšlo podle předpokladů, jediným problémem při měření rychlých oddělovačů byla malá strmost výstupního napětí MLC-interfacu, což mohlo ovlivnit reakční dobu oddělovačů. Možným řešením by bylo přidání dalšího hradla mezi výstup MLC-interfacu a vstup oddělovače.

Při měření odolnosti strmosti napětí se nám nepodařilo dosáhnout překlopení výstupu, ale pouze zákmitů, které by nejspíš chybu dále v obvodech nezpůsobily. Problémem bylo nedosažení vysokých strmostí napětí, což bylo dáno nevhodným rozložením plošného spoje. Pro omezení parazitních parametrů plošného spoje by bylo vhodné použití co nejkratších cest mezi generátory pulsů a měřenými oddělovači. Dalším možným vylepšením měřicího obvodu by mohlo být přidání další zátěže na vstup a výstup pro ověření autenticity v reálném obvodu. V tomto zapojení pracují oddělovače pouze do kondenzátoru s kapacitou 33 pF, což působí jako další filtrace, ale reálné zapojení postihuje jen částečně.

Literatura

1. **Texas Instruments Inc.** TIPL - What are creepage and clearance? [Online] [Citace: 22. 5 2022.] <https://training.ti.com/ti-precision-labs-isolation-introduction-isolation-standards-and-certifications>.
2. **Analog Devices Inc.** Breaking Ground Loops with Functional Isolation to Reduce Data Transmission Errors. [Online] [Citace: 25. 5 2022.] <https://www.analog.com/en/technical-articles/breaking-ground-loops-with-functional-isolation.html>.
3. **Manfred, FROHN.** *Elektronika: Polovodičové součástky a základní zapojení*. 1. dotisk 1. českého vydání. Praha : BEN - technická literatura, 2009. ISBN 80-7300-123-3.
4. **Analog Devices.** Anatomy of a Digital Isolator. [Online] <https://www.analog.com/en/technical-articles/anatomy-of-a-digital-isolator.html>.
5. **SEMIKRON International GmbH.** *Application Manual Power Semiconductors*. Ilmenau : autor neznámý, 2015. ISBN 978-3-938843-83-3.
6. **Fu, Fred Yue.** *GaN Power HEMT Tutorial: GaN Basics*. místo neznámé : GaNPower International Inc.
7. **Fu, Fred Yue.** *GaN Power HEMT Tutorial: GaN Driving*. místo neznámé : GaNPower International Inc.
8. **Hitachi.** Integrated gate-commutated thyristors (IGCT). *hitachienergy.com*. [Online] 21. 5 2022. <https://www.hitachienergy.com/offering/product-and-system/semiconductors/integrated-gate-commutated-thyristors-igct>.
9. **Texas Instruments Inc.** Critical isolated gate driver specifications TIPL 503 TI Precision Labs –Isolated Gate Drivers. [Online] 30. 4 2018. [Citace: 22. 3 2022.] <https://training.ti.com/ti-precision-labs-isolation-critical-isolated-gate-driver-specifications>.
10. **Toshiba.** *Aging Variation Data of Photocouplers*. [Online] [Citace: 15. 5 2022.] <https://toshiba.semicon-storage.com/us/semiconductor/knowledge/e-learning/discrete/chap5/chap5-12.html>.
11. **Texas Instruments Inc.** Isolated gate driver challenges and solutions TIPL 504 TI Precision Labs –Isolated Gate Drivers. [Online] 30. 4 2018. [Citace: 22. 3 2022.] <https://training.ti.com/kr/isolated-gate-driver-challenges-and-solutions>.
12. **Avago Technologies.** EEWeb. *Active Miller Clamp*. [Online] [Citace: 24. 5 2022.] <https://www.eeweb.com/active-miller-clamp/>.
13. **Analog Devices Inc.** The Use of Robust Digital Isolators in the Harsh Environments of Electric Motor Drives. [Online] [Citace: 24. 5 2022.]

<https://www.analog.com/en/technical-articles/the-use-of-robust-digital-isolators-in-the-harsh-environments.html>.

14. **EDN**. How to design with capacitive digital isolators. [Online] 28. 5 2009. [Citace: 24. 5 2022.] <https://www.edn.com/how-to-design-with-capacitive-digital-isolators/>.

15. **Texas Instruments Inc.** TIPL - Magnetic sensors. [Online] 29. 9 2021. [Citace: 21. 5 2022.] <https://training.ti.com/sites/default/files/docs/hall-effect-current-sensing-presentation-quiz.pdf>.

16. Introduction to Isolation Amplifier. *theengineeringknowledge.com*. [Online] [Citace: 20. 5 2022.] <https://www.theengineeringknowledge.com/introduction-to-isolation-amplifier/>.

17. **Texas Instruments Inc.** TIPL - Introduction to isolated amplifiers. [Online] 30. 4 2018. [Citace: 22. 5 2022.] <https://training.ti.com/ti-precision-labs-isolation-introduction-isolated-amplifiers>.

18. **Texas Instruments Inc.** . TIPL - Introduction to isolated modulators. [Online] 13. 6 2018. [Citace: 22. 5 2022.] <https://training.ti.com/ti-precision-labs-isolation-introduction-isolated-modulators>.

19. **STMicroelectronics**. Isolated ADCs. [Online] [Citace: 22. 5 2022.] <https://www.st.com/en/data-converters/isolated-adcs.html>.

20. **Texas Instruments Inc.** *SLUA909 - Common Mode Transient Immunity (CMTI) for UCC2122x Isolated Gate Drivers*. Dallas, Texas 75265 : autor neznámý, 2018.

21. **CT micro**. Katalog H11L1 H11L2 H11L3. 2014. Rev 1.

22. **Analog Devices Inc.** Katalog ADuM1300/ADuM1301. 2012. Sv. D03787-0-3/12(I), Rev. I.

23. **Texas Instruments Inc.** Katalog ISO1540 ISO1541. 2012. Sv. SLLSEB6.

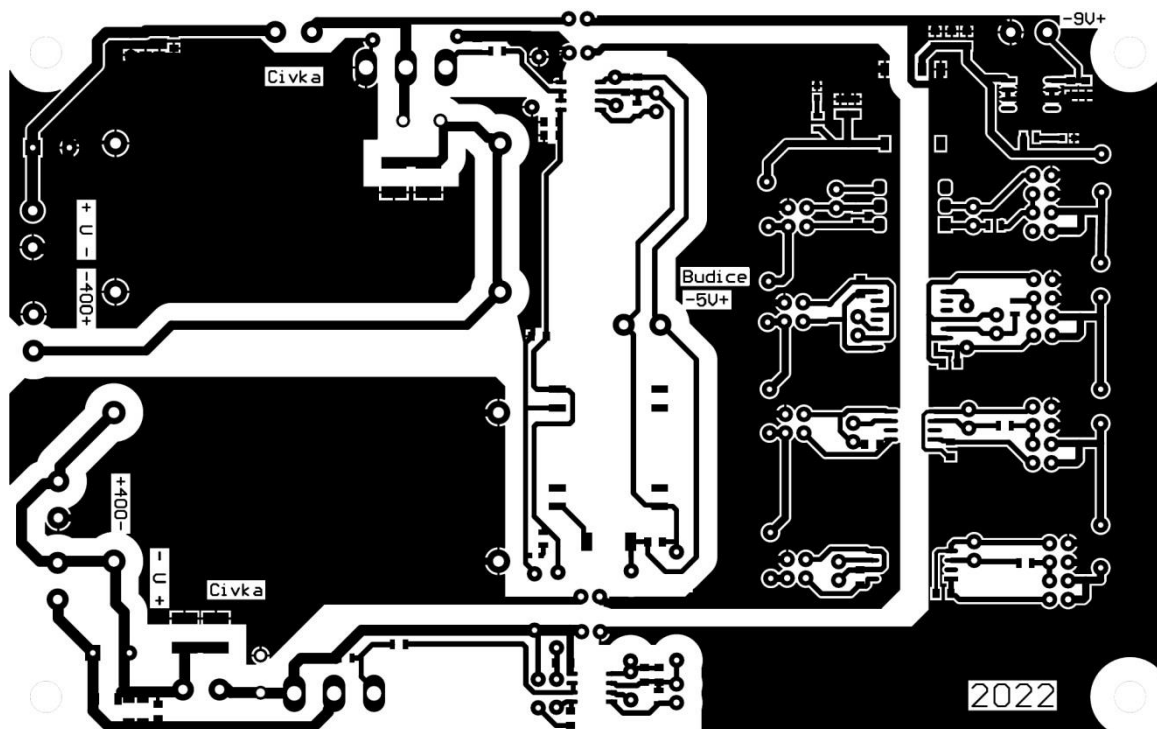
24. **Texas Instruments Inc.** Katalog ISO7720 ISO7721. 2016, revize 7/2018. Sv. SSLSEP3C.

Zdroje obrazków

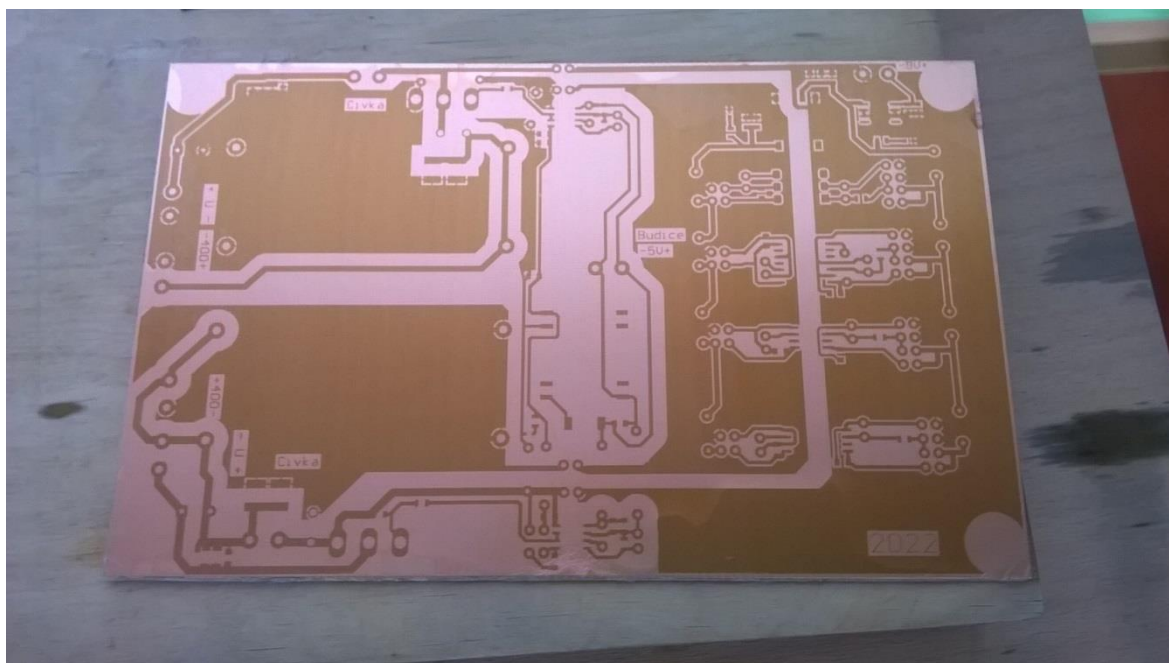
- I. <https://www.analog.com/-/media/analog/en/landing-pages/technical-articles/polyimide-film-uses-for-digital-isolators/334664-figure-01.jpg?w=900&vs=1>
- II. <https://www.industrysourcing.cn/ueditor/php/upload/image/20220519/1652944732490259.jpg>
- III. https://e2e.ti.com/cfs-file/_key/communityserver-blogs-components-weblogfiles/00-00-00-03-25/2772.Digital_5F00_isolator_5F00_construction.png
- IV. <https://www.edn.com/wp-content/uploads/media-1060189-20090529-figure-01.jpg>
- V. https://mikrokontroler.pl/wp-content/uploads/artykuly/iCoupler_separatory_galwaniczne_do_interfejsow_komunikacyjnych/rys6.gif
- VI. <https://www.electronicandscommunications.com/2017/07/isolation-amplifiers.html>
- VII. <https://training.ti.com/ti-precision-labs-isolation-introduction-isolated-modulators>

Přílohy

Fotodokumentace výroby plošného spoje a měření, kompletní schéma zapojení měřeného obvodu.



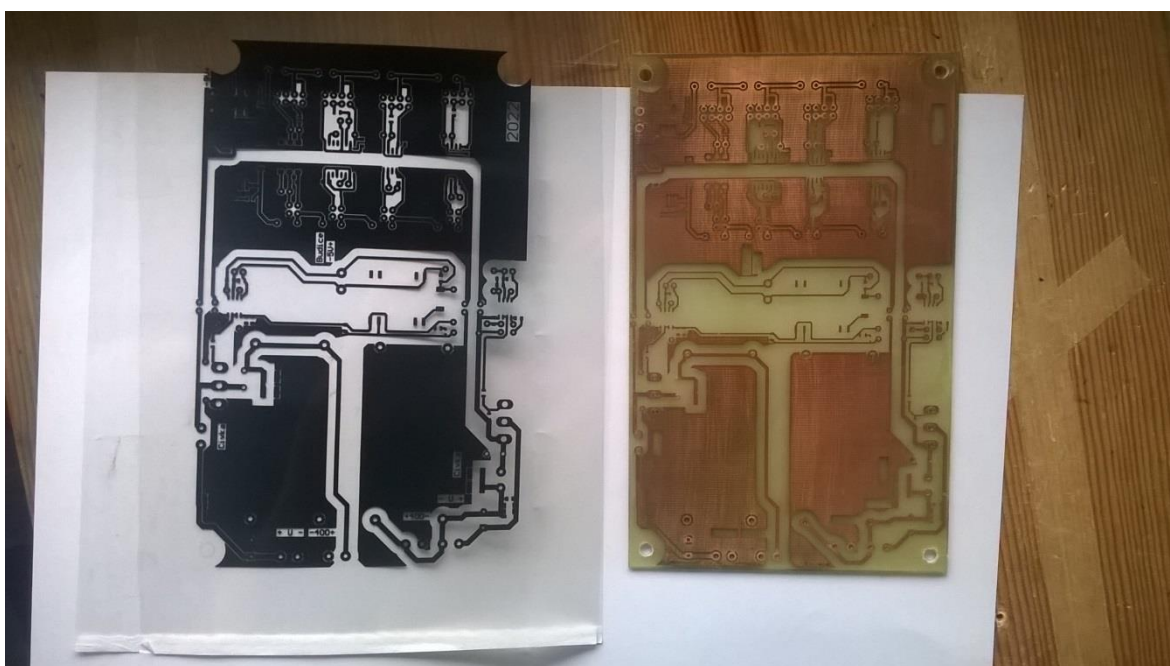
Obr. P. 1: Maska plošného spoje



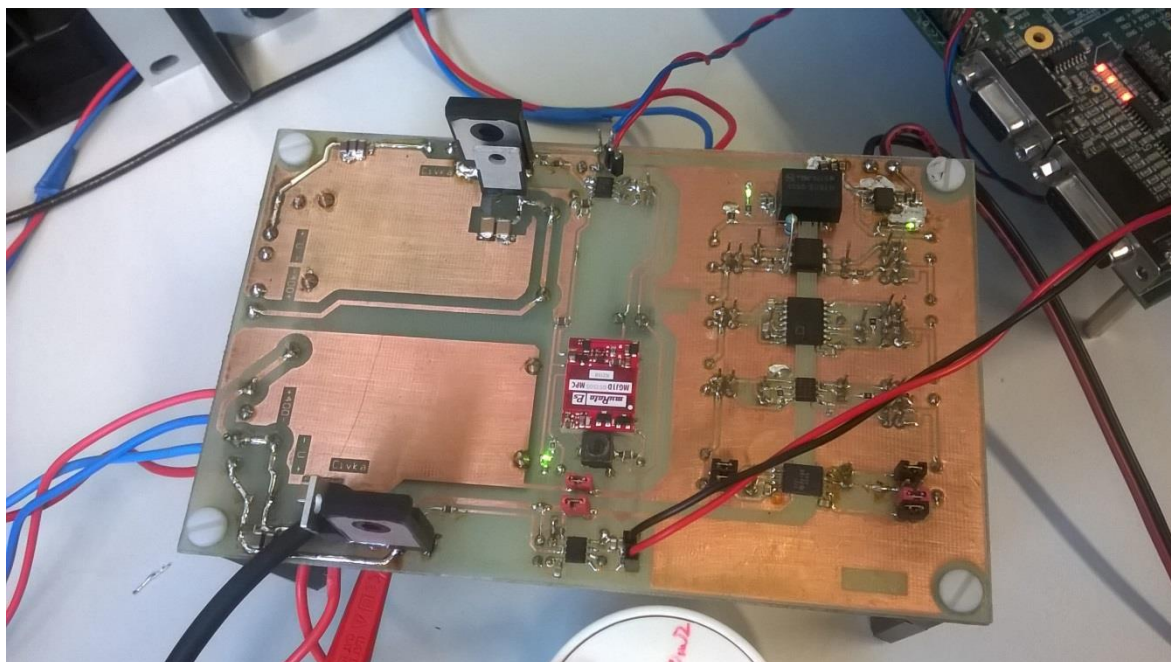
Obr. P. 2: Vyvolaný plošný spoj



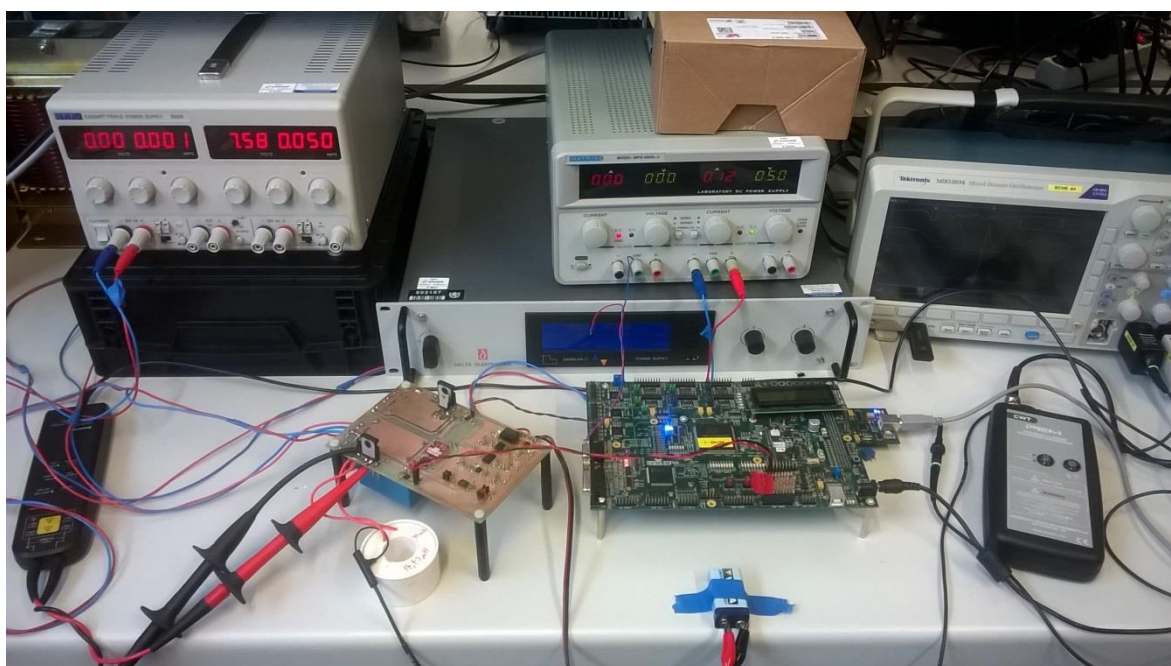
Obr. P. 3: Leptání v roztoku chloridu železitého



Obr. P. 4: Hotový plošný spoj a osvitová maska na fólii



Obr. P. 5: Osazený plošný spoj



Obr. P. 6: Měření na přípravku

