

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Lokalizace poruch rotorového vinutí turbogenerátorů

Originál (kopie) zadání BP/DP

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na problematiku izolace vinutí rotorů turbogenerátorů, na poruchy, které se zde vyskytují a jejich příčinu. Poté je zde představena metoda měření za pomoci RSO. A v poslední kapitole jsou zpracovány některé z výsledků měření.

Klíčová slova

Turbogenerátor, rotor, vinutí, mezizávitový zkrat, izolace, čela vinutí, sběrací kroužky, měření, signál, osciloskop.

Abstract

This master thesis presents the issues of rotor winding in turbogenerators, faults which can occur, their cause. After that, there is introduced the method of measuring with RSO. And in the final chapter, there are written up some conclusions from several measurements.

Key words

Turbogenerator, rotor, winding, short turn, insulation, end-winding, slip rings, measurement, signal, oscilloscope.

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 12.5.2014

Jméno příjmení

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Miroslavu Hromádkovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Také bych velmi rád poděkoval svému druhému vedoucímu práce Ing. Janu Klasnovi, který byl mým vedoucím v rámci společnosti Brush SEM s.r.o. Děkuji také všem zaměstnancům fakulty, kteří mi poskytli oporu a potřebné zázemí, abych mohl tuto práci napsat. Rád bych také poděkoval několika kamarádům, kteří mi pomáhali při řešení a kteří již pracují v oboru konstrukce motorů, Ing. Tomáši Matouškovi a Ing. Radoslavu Šebkovi.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 IZOLAČNÍ SYSTÉMY VINUTÍ ROTORU	11
1.1 IZOLACE OHYBŮ A DRÁŽEK ROTORU	11
1.2 IZOLACE ČEL VINUTÍ A BLOKACE	14
1.3 IZOLACE UDRŽOVACÍCH KRUHŮ	16
2 DIAGNOSTICKÁ METODA RSO	17
2.1 ÚVOD DO MĚŘENÍ S RSO	17
2.2 ZÁKLADNÍ POPIS FUNKCE	18
2.3 PROBLÉMY POUŽITÍ RSO MĚŘENÍ	22
2.4 RSO MĚŘENÍ ZA BĚHU	24
3 MĚŘENÍ S RSO	25
3.1 PŘÍPRAVA A POSTUP MĚŘENÍ S RSO	25
3.2 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ	28
3.2.1 <i>Popis vytváření grafické závislosti</i>	28
3.2.2 <i>Výstup z měření mezizávitových zkratů na jedné cívce</i>	32
4 ZÁVĚR	34
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	35
PŘÍLOHY	1

Seznam symbolů a zkratk

T_G teplota skleněného přechodu [$^{\circ}\text{C}$]

RSO Recurrent Surge Oscillograph

I proud [A]

U napětí [V]

R odpor [Ω]

C kapacita [F]

L indukčnost [H]

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na řešení problematiky ohledně mezizávitových zkratů na vinutí rotorů turbogenerátorů.

V první části se nachází teorie k izolaci používané na vinutí rotorů, používané materiály a způsoby zhotovení daných izolací, včetně několika příkladů na ukázkou. Druhá část představí samotný princip měření za pomoci RSO, jeho možnosti využití, postupy a samozřejmě výhody a nevýhody s ním spojené. V poslední kapitole je podrobněji popsán postup při měření, který byl prováděn a jsou zde uvedena samotná měření s jejich popisem a výstupy, které z toho vyplývají pro danou problematiku.

1 Izolační systémy vinutí rotoru

Elektrická izolace je vyžadována v několika typech rotorového vinutí, včetně hladkých rotorů, rotorů s vyniklými póly, a rotorů asynchronních motorů. Obvykle se zde nachází izolace závitová a hlavní izolace v drážkách. Napětí přítomné v rotorovém vinutí je mnohem menší než to, které se nachází ve statorovém vinutí. Takže, návrh izolačního systému pro vinutí rotoru bývá limitováno mechanickými a tepelnými vlastnostmi izolačního systému.

Tato část poukazuje na to, kde je izolace potřeba, a na zatížení, která působí na izolaci u různých komponent vinutí, jako například čela vinutí, sběrací kroužky, obruče etc. Je zde také popsáno jaké se používají materiály a jak se vytváří dané izolace.

Izolace vinutí rotoru je vystavena zatížením, která jsou jiná od těch na statorovém vinutí. Mezi rotorová zatížení mohou patřit:

- Teplotní zatížení od proudových ztrát RI^2 (stejnoseměrného napětí) na pólovém vinutí
- Odstředivé síly z důvodu vysokých otáček rotoru
- Relativně malé elektrické zatížení, jelikož pólové a tří-fázově vinuté rotorové vinutí zřídka operuje při více než 1000V stejnosměrných. Se statickými excitačními systémy, napěťové špičky z tyristorového řízení mohou vést k částečným výbojům u velmi velkých generátorů, které operují za velkých stejnosměrných napětí.
- Olej, mazivo a abrazivní materiály, které mohou být přítomny v zařízení, mohou způsobit, elektrické spojení buď v závitech, nebo hlavní izolaci, pokud měď není plně izolována nebo důsledkem abraze izolace.
- Expanze a smršťování měděných vodičů pokaždé, když se daný motor zapne nebo vypne, pohyby mědi vedou k abrazi izolace a/nebo deformaci měděných vodičů v čelech vinutí. [1]

1.1 Izolace ohybů a drážek rotoru

Nejpoužívanější asynchronní motor je s klecí na krátko. Rotor se skládá z těžké mědi, plechů, nebo tyčí ze slitin hliníku svařených s čely vinutí a vloženy do železných

plechů. Motory s klecí nakrátko pracují bez elektrických kluzných kontaktů jakéhokoli druhu. Všeobecně není použita žádná izolace mezi vodiči a plechy, jelikož rozdíl vodivosti mědi nebo hliníku k železným plechům a nízkému napětí, při kterém rotor pracuje, postrádá potřeby.

Většina ostatních druhů rotorů v motorech a generátorech pracuje při vyšších napětích a mají jak hlavní izolaci drážkovou, tak i izolaci mezizávitovou. Rotory v menších motorech mají obvykle vsypávané vinutí, používající kulatý emailovaný vodič (obvykle s lakovým mořením), které slouží zároveň jako závitová izolace a i jako hlavní izolace drážková. Pro rotory vyšších napětí, s buď náhodně-vinutou cívkou, nebo s tvarovaným vinutím, je použita oddělená drážková izolace a závitová izolace. Tato izolace je obvykle vyrobena z vytvarovaných částí materiálu, které jsou uloženy na místě před vložením vinutí. Jinak, některé malé rotory používají elektrostatický pokovovací proces pro využívající polymerových prášků na drážky kvůli izolaci.

Materiály zvolené na drážky a závitovou izolaci se liší v závislosti na teplotní třídě vinutí a na napětí a výkonu stroje. Materiály na vytvarované archy (role) mohou být z aramidového papíru (jako je např. Nomex od spol. Dupont) pro středně velké generátory nebo lamináty z plastových filmů a netkaných vrstev pro menší stroje. Velmi častá drážková izolace se nazývá DMD [jako laminát Dacron, Mylar, Dacron (výrobce Dupont)], s vhodným lepidlem. DMD je vyráběno spol. Dupont a ostatních dodavatelů z polyethylentereftalátu polyesterové pryskyřice na film a netkané vláknové formy. Řada podobných laminátů je k dispozici k použití ve strojích pro různé teplotní třídy. Filmy, které se používají, obsahují polyetylen naftalen, nylon a polyimidy. Ty netkané obsahují bavlněný papír, nebělený papír z lisované dřevěné drti, síťku z aramidových vláken, a kombinaci polyesteru a sklotextilu ve tvaru síťky. Podobné materiály se používají na závitovou izolaci ve tvaru kousků odříznutých z archu nebo role. Pro hladké rotory s cívkou z těžké mědi, se používají tenké lamináty ze sklotextilu a polyesteru nebo epoxidové pryskyřice.

Drážková izolace pro dvou a čtyř pólové hladké rotory se vyvinula v průběhu času z kompozitu založeném na odštěpcích micy s lisovaným papírem, sklem, nebo azbestových vláken a pojící pryskyřice do předem vytvarovaného tvaru drážky nebo do částí drážkové armatury. Používá se několik metod, pro výrobu těchto izolačních částí.

Zahrnuje to individuální formování, vyráběné v tlakovém lisu, tlakové tvarování v krokovém lisu, a hydraulické nebo autoklávné tvarování prepregových vrstev do železných plechových forem. Dlouhé díly z pozdějších dvou metod jsou nařezány a upraveny do jednotlivých dílů. Polyesterové pryskyřice jsou používány k naimpregnování skleněných tkanin pro individuálně vylisované díly, zatímco epoxidová pryskyřice se používá jako impregnace na prepregový sklotextil. Tento proces může také přidat speciální vrstvy aramidové vlny a imidových filmů odolných vysokým teplotám, na zvýšení odolnosti proti prasknutí a elektrickému průrazu. Hydraulický a autoklávný proces mohou také použít tyto materiály, ačkoliv spojitě-vlákno netkaných sklotextilových archů, naimpregnovaných epoxidovou pryskyřicí od společnosti 3M Company pod tržním názvem Scotchply, bylo zatím neúspěšnější.

Pryskyřice zvolené na drážkovou izolaci musí být fyzicky pevné, odolné teplotním vlivům, a mít teplotu skleněného přechodu (T_G) pro tvrzený materiál vyšší než je jeho operační teplota. Teplota T_G je teplota, při které tvrzená pryskyřice měkne nebo se mění z krystalické struktury na gumovitou nebo přechází do amorfního stavu. Provozování zařízení nad touto teplotou dovolí pryskyřici vytékat z výztuh, což má následek zničení částí izolace.

Většina hydrogenerátorů a nízko-otáčkových synchronních motorů s nominálním výkonem kolem 50MW mají rotor s vyniklými póly. Vinutí používané na většině motorů a generátorů s výkony pod pár megawatt je vícezávitové vrstvené. V tomto návrhu je použit izolovaný vodič, který má obvykle obdélníkový průřez. Každý pól je zkonstruován s několika stovkami závitů vodiče několik vrstev hlouběji, obalených kolem ocelových plechů tvořících pól. Závitovou izolaci tvoří izolace magnetického vodiče. Izolační těsnění a proužky jsou umístěny mezi vodiči a plechy sloužící jako hlavní izolace. Často se celý pól může ponořit do izolační kapaliny, aby slepil různé díly dohromady.

Rotory s vyniklými póly ve strojích nad 50MW, a pro ty, které pracují při 1200 otáčkách za minutu a více, upřednostňují „strip on edge“, návrh, jelikož lépe snáší rotační odstředivé síly. Póly pro tyto typy vinutí mohou být zhotoveny jak z ocelových plechů nebo z ocelového masivu. V případě pólu z ocelového masivu, používaný na větších vysoko otáčkových strojích, pólové nástavce mohou být přišroubovány nebo nedílné. V tomto případě, tenký proužek mědi je vytvarován do tvaru rámu a cívky jsou plně

zpracovány, zahrnující impregnaci lakem, než jsou umístěny na póly. Jedinou výjimku je typ integrovaného pólu, pro který musí být rámy spojeny dohromady, aby vytvořili cívku, v průběhu umístění na pól. Oddělovače slouží jako závitová izolace, aby oddělovali každý tento měděný rám od sebe. Na některých měděných rámech, obzvláště blízko povrchu pólu, se může použít izolační páska na měď, kvůli zvýšení přibližovací vzdálenosti. Měděné rámy jsou spojeny do série, aby vytvořili cívku. Jako u návrhu vícevrstvého vyniklého pólu, vinutí je izolováno od uzemněného pólu izolačním těsněním a páskami. Pojící nátěry pro konstrukci vyniklého pólu jsou zvoleny podle teplotní třídy stroje a tuhosti a pružnosti potřebné pro dané účely. Mica, obvykle zvolena pro hlavní izolaci je čistě muskovite mica, spojená shellacem, shellac-epoxidem, nebo vinyl-alkydem. Směsice odštěpků micy, aramidových archů, sklotextilu a epoxidových pryskyřic je také použita. [1]

1.2 Izolace čel vinutí a blokace

Hladké rotory pro dvou a čtyř pólové konstrukce většinou pracují v čistém prostředí. Větší generátory jsou obvykle plně uzavřené konstrukce, ve kterých rotor pracuje v atmosféře stlačeného vodíku, aby se snížily ztráty na vinutí. Stroje chlazené vzduchem obecně recirkulují chladící vzduch přes výměníky tepla, takže pouze část tohoto vzduchu je předčištěný vzduch. Tento vzduch je obvykle čištěn průchodem přes filtry nebo odstředivé čistící jednotky pro odstranění většiny pevných částic. Čisté prostředí dovoluje měděným okrajům pólových cívek, mimo drážky, přímé působení chladícího média pro maximální účinnost chlazení. Pro větší cívky, je každý závit oddělen od sousedícího závitu, proužkem izolace plechu. Cívky menších rotorů, které jsou vytvořené bočním vinutím, obvykle používají pásy na každý druhý závit vně drážek. Závitová páska je většinou tvořena B-stav epoxidovou nebo jinou pryskyřicí impregnovaným mica papírem nebo odštěpkou, podpořeným sklotextilovými vlákny.

Rotory chlazené vzduchem, které jsou navrženy pro použití v prostředí s nečistotami, jako jsou doly a chemické zpracování, obvykle mají celá čela vinutí uzavřená v struktuře z pásků vyrobené z pryskyřicí impregnovaného sklo textilového pásu. Některé konstrukce mají hliníkové pláty zasazené proti izolaci čel vinutí a mezi přilehlé cívky pro lepší odvod tepla.



Obr. 1: Izolace čel vinutí rotoru

Čela vinutí nejsou stabilní při odstředivém zatížení, pokud nejsou zajištěny obručemi a jsou bezpečně zablokovány dohromady. Chybějící nebo špatně posunutá výplně čel vinutí (bloky) mohou vést k deformaci cívek díky teplotní roztažnosti při zátěži. Jistící materiály jsou obvykle obrobené z lisovaných plechů. Ačkoliv se používala azbestová tkanina v minulosti, byla nahrazena sklotextilovou tkaninou, impregnovanou phenolic, polyesterovou nebo epoxidovou tepelně tvrzenou pryskyřicí. Jištění mezi přímými úseky čel vinutí vystupující z drážek, složené z bloků ve tvaru klínů, zatímco koncové bloky jsou obdélníkové díly se zahnutými vnějšími okraji. Obvykle se zde nacházejí proužky laminátu připevněného k horní části jištění za účelem napomoci prevenci jejich posunutí. Veškerý prostor v čelech vinutí je vyplněn těmito bloky a mohou být spojeny na místě vrstvou B-stavu pryskyřicí impregnovaným sklotextilem a natřené nebo nastříkané termosetickým izolačním lakem.



Obr. 2: Záběr na blokace čel vinutí rotoru

Potom co všechny bloky a vazby jsou zhotoveny, celá čela vinutí jsou za tepla radiálně vylisována. Tlak dokončí tvrzení pryskyřice a laku a stlačí vnější průměr obalu cívky pod průměr udržovacích kruhů a jejich izolace, k dovolení namontování kruhů přesně. [1]

1.3 Izolace udržovacích kruhů

Čela vinutí cívek u hladkých rotorů musí být zajištěny proti radiálnímu pohybu za pomoci těžkých udržovacích kruhů, které jsou tepelně smrštěny na konce drážek a/nebo na obrobené části hřídele rotoru, axiálně vně čel vinutí cívek. Záleží na konstrukci, zdali jsou tyto kruhy obráběné z magnetické nebo z nemagnetické oceli a jsou to ty nejvíce zatížené části rotoru, jelikož musí snášet jejich odstředivou zátěž a zátěž cívek, které jsou pod nimi. Izolace udržovacích kruhů je vložena mezi radiální vnější (nebo hořejší) pólových cívek a udržovacích kruhů. Bylo použito množství materiálů na izolaci udržovacích kruhů. Počáteční návrhy využívali naskládané archy mica papíru. Nedávná praxe používala několik částí tvarovaných archů materiálů vyrobených z epoxidu a sklo

textilu. Často, stlačitelný materiál, jako je aramidový papír, je vložen mezi primární izolaci a hořejšek cívek k poskytnutí nějakého útlumu. Montáž udržovacích kruhů přes izolaci vyžaduje, aby byly ty ocelové kruhy nahřáty pomocí plynových hořáků nebo indukci. Izolace udržovacích kruhů musí být připnuta k čelům vinutí, obvykle ocelovými pásy, v průběhu usazování kruhů na místo. Tyto pásy jsou odstraněny, jakmile se kruhy dostanou přes izolaci.[1]

2 Diagnostická metoda RSO

Využití metody měření s RSO (Recurrent Surge Oscillograph), na detekci zkratů na pólovém vinutí u velkých synchronních generátorů s válcovými rotory, se stává čím dál tím více využívanou metodou. V této části se tedy dostáváme k řešení samotného zařízení RSO a měření za jeho pomoci. Jaké má dané měření výhody, nevýhody, jak lze se zařízením manipulovat, a kde se mohou objevit nejčastěji chyby.

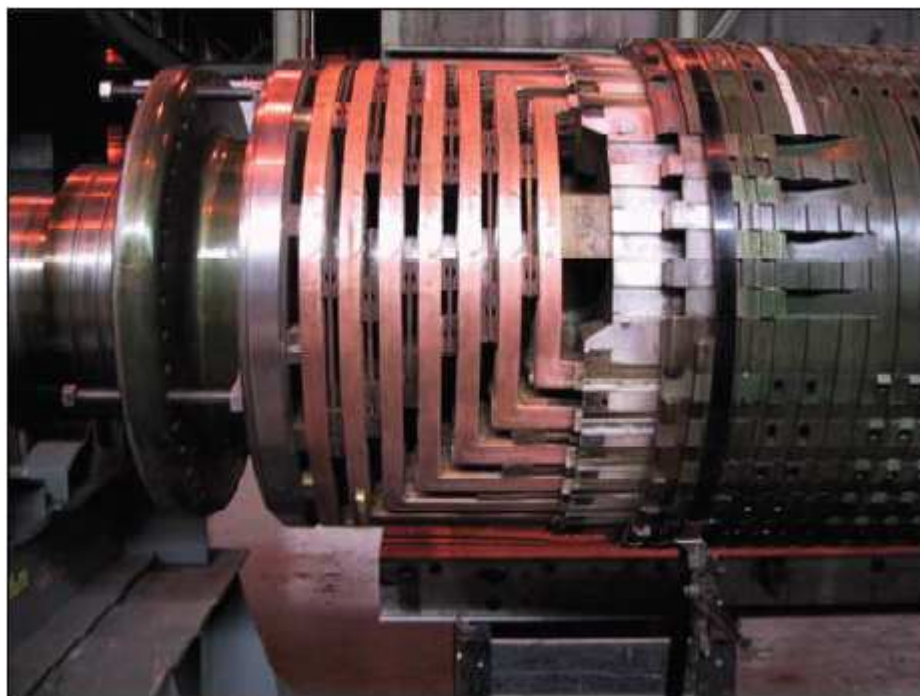
2.1 Úvod do měření s RSO

Posuzování stavu vysoko-otáčkových (válcových rotorů) turbogenerátorů bylo vždy výzvou. Toto obzvlášť platí pro pólové vinutí, které je z větší části nepřístupné pod klíny a udržovacími kruhy. Omezený přístup k prohlídnutí je možné u některých vinutí rotorů skrze radiální ventilační otvory v klínech a pod udržovacími kruhy.

Příležitost na testování je stejně limitována. Odpor mědi může být přesně změřen, ale pokud se vyvíjí nějaké poškození, test neodhalí tento stav, dokud je v této prasklině dobré elektrické spojení. Zkouška výdržným napětím na hlavní izolaci není obecně doporučována a nízko napěťový test izolačního odporu („megger“) převážně souvisí pouze s čistotou a vlhkostí.

Mezizávitový zkrat je velmi důležitá a relativně běžná porucha pólového vinutí. Za běhu se mohou tyto zkraty odhalit pomocí nízkých a/nebo kolísavých hodnot oteplení pole. Ale chování vybavení může být také jen důsledek vadného měřicího přístroje nebo elektrického obvodu. Nejspolehlivější možností jak odhalit zkraty za běhu je použití rotorové proudové sondy. Sonda je jednoduché, relativně levné zařízení, a poměrně přesně řekne počet zkratů a určí i cívky, na kterých se zkraty vyskytují. Ale namontování

sondy musí proběhnout při sundaném pólu a sondy nejsou zatím nainstalovány ve velkém množství generátorů.



Obr. 3: Čela vinutí rotoru

Pokud stojí nehybně, a existuje velký počet zkratů, pak odpor mědi bude mnohem menší než původní – v poměru k procentu zkratů. Ale tento test nepodává žádné informace o umístění daných zkratů. Kde je možný fyzický přístup k mědi v závitech nebo cívkách, průzkum sondou na úbytek napětí nebo odporu může určit danou cívku (nebo závit), která je ve zkratu. Ale zprostředkování tohoto testu je velmi časově náročné a většinou je potřeba demontáž pole, potažmo sundávání udržovacích kruhů.

Test za pomoci Opakované Rázové Vlny (RSO) předčí mnohá předchozí omezení pro testování zkratů, jak při stojícím rotoru tak i při otáčení.[2]

2.2 Základní popis funkce

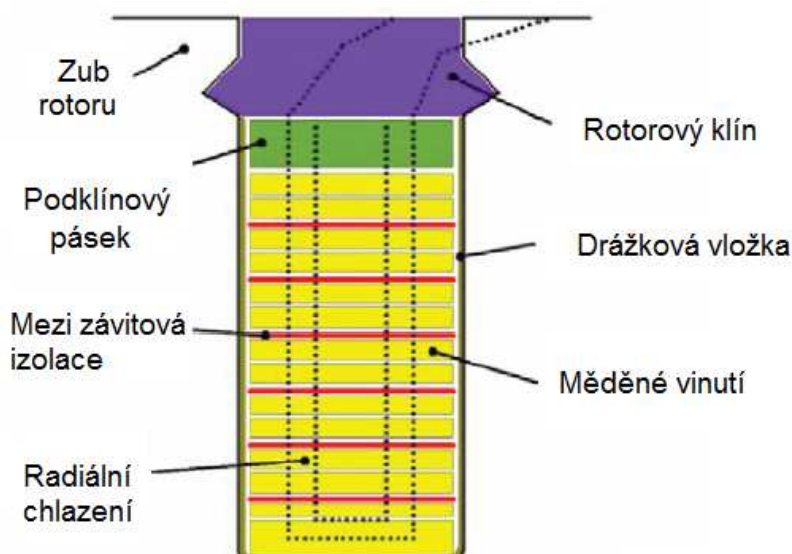
Foto výše (obr. 3) zobrazuje koncovou sekci (vyčnívající nebo čelní vinutí) typického válcového rotoru pólového vinutí. Na fotu (obr. 4) je ukázána prostřední část pólového vinutí.

Oba obrázky poukazují na charakteristický rys pólového vinutí válcových rotorů a to je jejich symetrie. Tato vlastnost je běžná pro všechny velké synchronní generátory, patřící do dvou nebo čtyř pólových strojů. Za běhu, pólové vinutí přenáší stejnosměrné napětí. Takže, správné znázornění obvodu je jednoduše odpor. Nicméně pokud zde proudí i střídavé napětí, kompletní znázornění obvodu by obsahovalo i indukance a kapacitance.



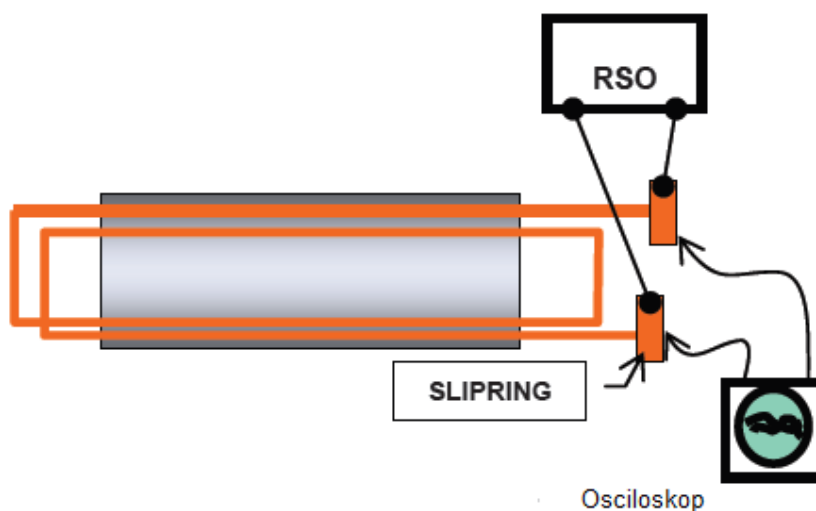
Obr. 4: Běžné pólové vinutí, jak střední části, tak i čela vinutí, některé závity jsou vysunuty z drážek

Pohled na obr. 3 a 4, poukazuje, že část vinutí (ta prostřední část), je ve velké blízkosti k tělu rotoru. Obrázek 5 zobrazuje průřez typické drážky, ukazující vodiče a jejich vzdálenosti od sebe a od těla rotoru.



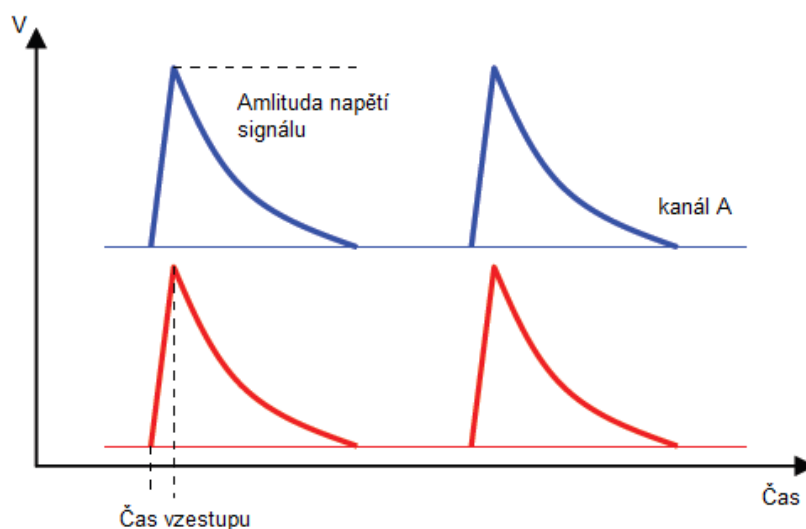
Obr. 5: Příčný řez drážkou válcového rotoru

Závity jsou mezi sebou v bezprostřední blízkosti jak uprostřed tak i v koncové sekci vinutí, ale v blízkosti těla rotoru se nacházejí pouze v té prostřední sekci, uvnitř drážek. Toto uspořádání má za následek vinutí s odporem, kapacitou a indukčností, která je velmi specifická pro každý návrh, ale která má některé běžné vlastnosti pro všechny stejné. Výpočet částí obvodu není jednoduchý, ale jeho měření ano. Pro ukázkou nízkofrekvenčního měření, je snadno vytvořitelné schéma ekvivalentního obvodu. Pro vyšší frekvence, je potřeba příklad náhradního vedení.



Obr. 6: Schéma zapojení měření RSO

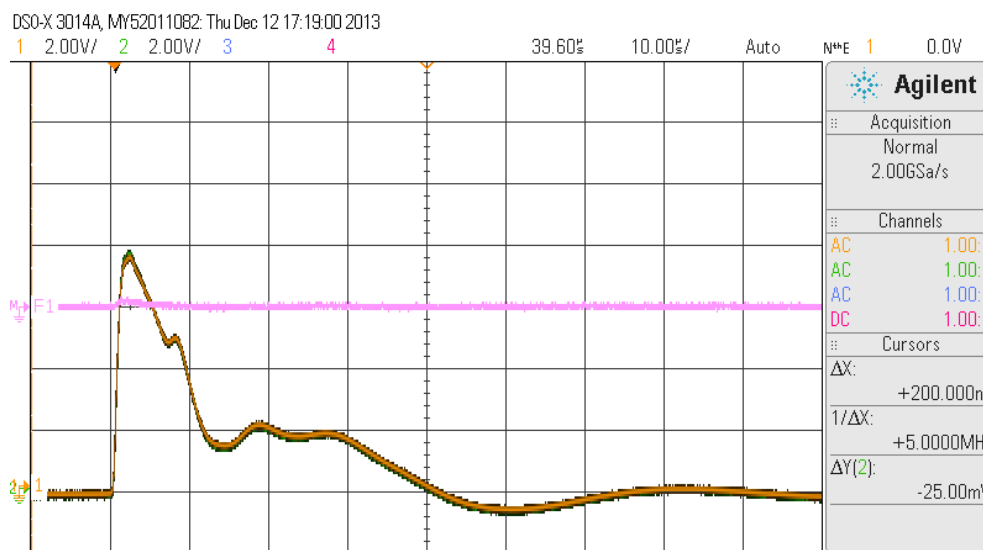
RSO je zařízení, které vysílá dva identické (párové) signály – jeden z každého konce vinutí. Navíc, vestavěný, nebo zvlášť připojený osciloskop je použit pro zachycení signálů na druhém konci vinutí, a pro zachycení jakýchkoliv odrazů, které se objeví. Na Obr. 6, je zobrazeno typické zapojení RSO, včetně zdroje napájení, propojení a osciloskopu.



Obr. 7: Párové signály z RSO

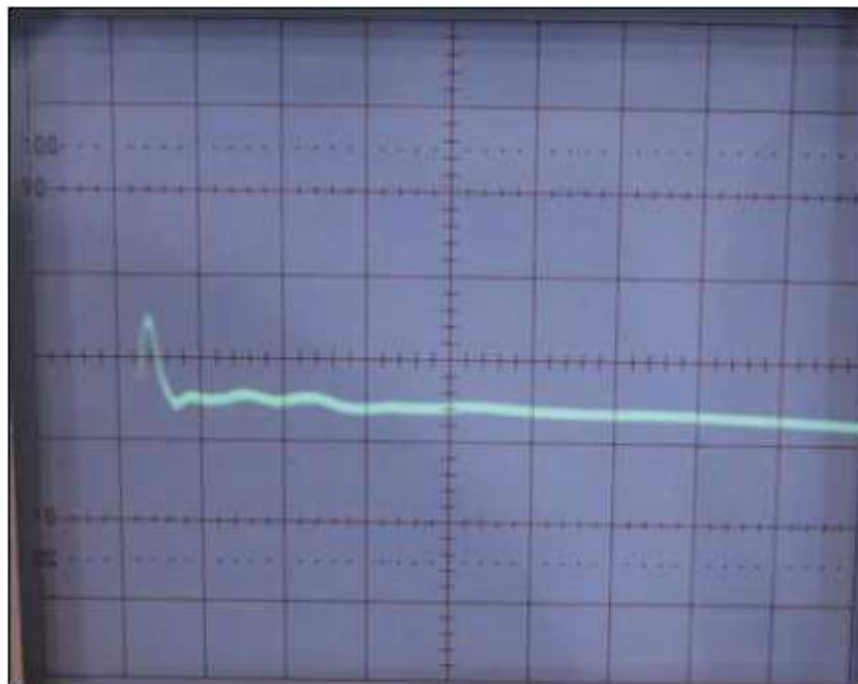
Tyto párové signály generovány RSO a ukázány na Obr. 7, mají rychlý čas vzestupu přímo úměrný k vysoké frekvenci vln. Impedance znázorněna pólovým vinutím pro tento vysokofrekvenční signál je vlnová impedance R-L-C distribučního obvodu.

Z teorie časové závislosti odrazu vlnění je známo, že signál, který má náhlou změnu vlnové impedance, bude mít za výsledek jeden zmenšený průchozí signál a odražený signál. Za dané velké symetrie pólového vinutí, všechny průchozí a odražené signály, budou takměř identické. Avšak pokud je zde nespojitost vlnové impedance, vytvořené existujícím zkratem na závitu nebo zkratem se zemí, oba párové signály vytvoří různou průchozí a odraženou vlnu. RSO využívá výhody tohoto faktu pro detekování zkratů na závitěch a se zemí. Jelikož zkraty pólového vinutí se zemí mohou být detekovány i jiným způsobem, hlavní účel RSO je detekce mezizávitových zkratů.



Obr. 8: Typický průběh signálů z RSO

Frekvence a čas náběhu je charakteristická pro každého prodejce RSO, ačkoliv běžně se pohybuje v řádu kHz a časem náběhu několika mikrosekund. Na obrázku 8 je zachycen typický průběh párových signálů na rotoru bez mezizávitových zkratů a se zemí.



Obr. 9: Výsledný součtový signál s viditelným zkratem na rotoru

Jak je ukázáno na obr. 8, je snazší rozpoznat přítomnost mezizávitových zkratů a jiných anomálií, díky převrácení jednoho ze signálů a sečení s tím druhým. To může být provedeno na osciloskopu. Výsledná křivka je přímka, pokud nejsou žádné zkraty přítomny, nebo přímka s výkyvy, pokud se zde nachází zkraty. Na obrázku 9 jsou vidět typické náznaky mezizávitových zkratů na rotoru. [2]

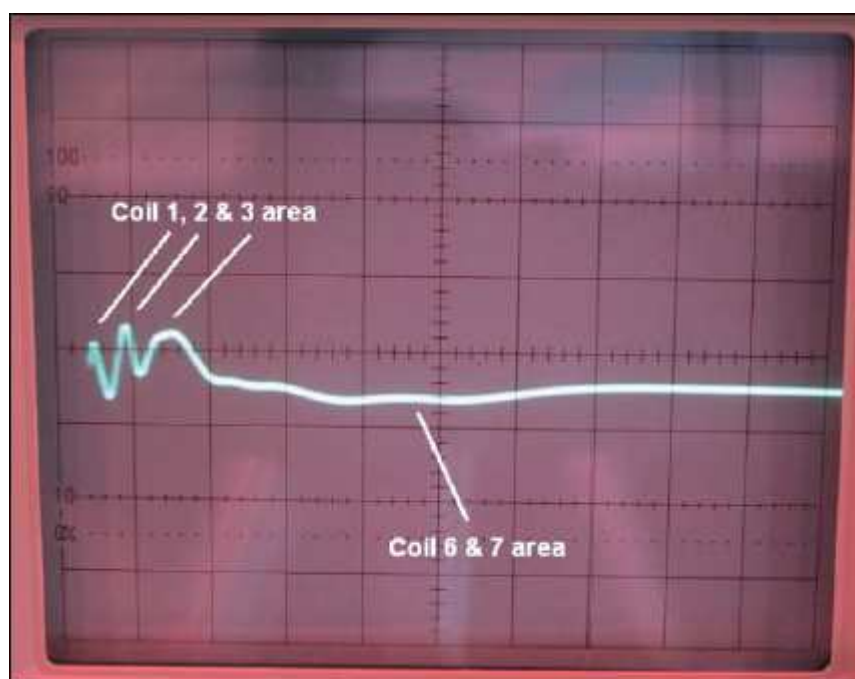
2.3 Problémy použití RSO měření

Jak již bylo vysvětleno dříve, existuje několik způsobů odhalení mezizávitových zkratů na rotorech turbogenerátorů. RSO má mezi nimi vedoucí pozici. RSO bylo poprvé použito ve Velké Británii v sedmdesátých letech, a postupně proniklo do Severní Ameriky od poloviny devadesátých let. Největšími výhodami RSO jsou: jednoduché použití a rychlá příprava a čas potřebný k měření, stejně jako fakt, že všechny odečty mohou být prováděny ze sběracích kroužků (v případě bezkartáčových jednotek, z konců pólového vinutí vedle diodového prstence. Hlavním použitím RSO je u stojících rotorů, buď namontovaných ve statoru, nebo vysunutých ven. Ale, RSO může být použito i za běhu pomocí sběracích kroužků. Toto měření je již dlouho využíváno s velkým úspěchem. Tato schopnost je poměrně důležitá v případech, kdy není

nainstalována proudová sonda ve vzduchové mezeře.

RSO není schopno přímo ukázat přesnou polohu zkratu, přestože zkušební uživatelé si mohou vytvořit schopnost pro identifikaci s velkou pravděpodobností, na které cívce a pólu se zkrat/y nacházejí. Výkyv na výsledné křivce blízko začátku cesty indikuje mezizávitový zkrat blízko jednoho ze sběracích kroužků. Jak se výkyvy oddalují od počátku na výsledné křivce, poukazují na mezizávitové zkraty na větších cívkách („malá,, cívka je ta nejbližší tělu pólu rotoru, kdežto ta „velká,, cívka je ta nejbližší kvadrurní ose rotoru).

Je velmi dobře známo, že většina mezizávitových zkratů „zmizí,, , pokud se rotor nehýbe. Důvodem je, že tyto zkraty jsou závislé na odstředivých silách, které působí, pokud se rotor otáčí vysokou rychlostí.



Obr. 10: Výsledná křivka, na které je vidět vícero zkratů

Některé z těchto tlakově-závislých zkratů mohou být detekovány při stojícím rotoru, když se bude měřit pod různými úhly natočení daného rotoru, dokud se nedocílí úplného otočení. Pro ty zkraty, které úplně zmizí při stojícím rotoru, se používá test za běhu motoru, popsán v části níže.

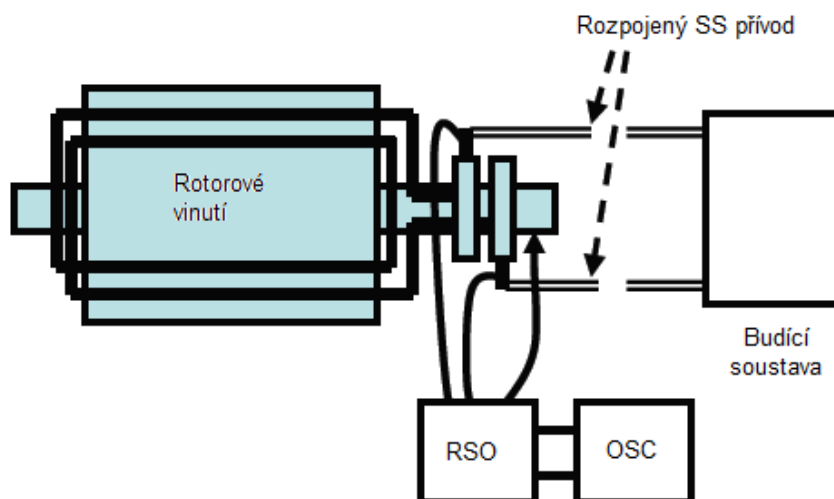
Jedním z předmětů zájmu je, jak je RSO bezpečné pro lidi a samotnou izolaci rotorového vinutí. Je zde nějaké nebezpečí pro obsluhu a může tento test způsobit vytvoření nových mezizávitových zkratů nebo spojení se zemí, kde předtím nebyly?

Všechny zařízení RSO generují párové signály přibližně od 5 do 15 V, a proto nepředstavují žádné nebezpečí obsluze. Typický velký čtyř pólový stroj, s, řekněme 600 V SS a 400 závitů, má ve výsledku 1.5 V na závit, a při stavu účinnosti pole dvou a půl násobku nominální hodnoty napětí, bude kolem 3.75 V na závit. Ačkoliv šíření napětí RSO signálů není lineární, tak výsledné napětí, při rozpětí 5 až 15 V, kterým RSO zatíží celé vinutí, je určitě stejné nebo menší velikosti. Také impedance zdroje RSO je velmi vysoká, což má za následek proud v řádech miliampér, i když se zde nachází úplný zkrat. Nakonec, nízké výstupní napětí z RSO, umožňuje obsluze měření a technikům pracujícím na rotoru, aby mohli pracovat na daném vinutí se zapojeným a běžícím RSO. Tato možnost je velmi nápomocná v průběhu některých etap opravy vinutí nebo montáže, kdy každá chyba vyúsťující v mezizávitový zkrat může být hned objevena a opravena.

Člověk musí být ale opatrný, než nazve jakýkoliv výkyv na křivce, mezizávitovým zkratem. Vinutí s extrémně zdeformovaným závitěm v čele vinutí, mohou projevit dostatečnou impedanční asymetrii, která má za následek pokřivenou výslednici na RSO. Spojení se zemí se na RSO projeví jako velmi velký výkyv, proto lze snadno rozlišit od mezizávitového zkratu. Tudíž jsou zapotřebí zkušenosti pro využití této technologie. [2]

2.4 RSO měření za běhu

Na obrázku níže (obr. 11) je vidět schéma zapojení měření pro testování rotoru za běhu. Je velmi důležité, aby všechny spoje na buzení byly volné. Jedna z ověřených metod je odstraněním komutátorových kartáčů a namontování jednoho nebo dvou kartáčů na sběrací kroužek na dobu měření. Tyto kartáče musí být izolovány od kartáčových držáků. Kvůli izolování, mohou být lehce zbrúšeny a potřeny lehkou vrstvou epoxidové pryskyřice. Poté je zapojen výstup z kartáče na výstup RSO a osciloskop. Zemní spojení zařízení RSO musí být spojeno s rotující hřídelí, buď přidržením (velmi opatrně!!) uzemněného vodiče zapleteného na tyči u hřídele, nebo spojením hřídele a zemními kartáči. Další možnou metodou připojení RSO na vinutí je spojením plusu a mínusu kartáčů, ale rozpojit obvod na straně budičů. [2]



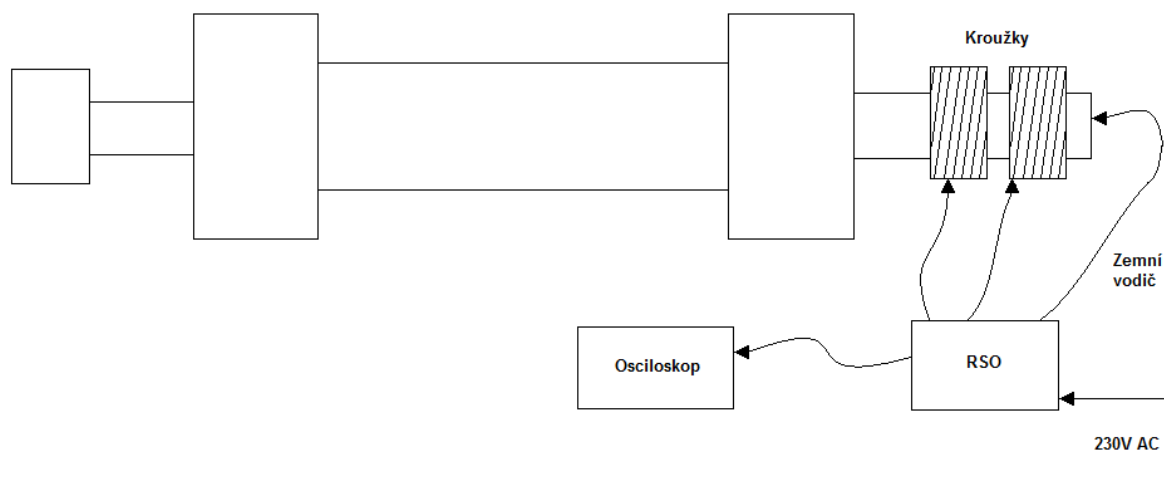
Obr. 11: Schéma zapojení měření pro testování za běhu rotoru

3 Měření s RSO

V předchozí kapitole, jsou vysvětleny základní záležitosti ohledně měření s RSO. Jeho největší problémy a naopak největší výhody s tímto měřením spojené. Tato část se pokusí osvětlit samotné měření, princip zapojení a nastavení, aby si každý mohl lépe představit jak je dané měření časově náročné a jak je náročné na přípravu a obsluhu při samotném měření. Po-té jsou zde uvedeny zpracované výsledky z měření a jejich vyhodnocení.

3.1 Příprava a postup měření s RSO

Samotné zařízení RSO není nikterak velké. Jedná se o krabici s rozměry základny 40cm na 50cm, výšce 40cm a o hmotnosti asi 4kg. Je to tedy zařízení poměrně velmi kompaktní. Důležitým faktem je ale nezbytnost osciloskopu pro provádění měření. Proto existují dvě varianty tohoto zařízení, se zabudovaným osciloskopem, bohužel porucha na osciloskopu by znamenala reklamaci celého zařízení, nebo s osciloskopem externím, který si uživatel připojí zvlášť, a je tedy čistě v jeho režii, pokud se na něm objeví závada. U osciloskopu si musíme ohlídat tyto dané parametry, musí disponovat dvěma nezávislými kanály, funkci na invertování jednoho kanálu a funkci součtu nebo rozdílu kanálů, šířku pásma alespoň 20 MHz a napět'ové rozlišení alespoň 0,5V/d. Pro úplnost popisu, je potřeba zmínit také propojovací vodiče, které musí být dostatečně dlouhé. Na obrázku níže (obr. 12), je zobrazeno schéma zapojení, kde je vidět, že napájení není přes další zařízení, ale jedná se přímo o zapojení měřicího přístroje RSO do sítě, neboli 230V střídavých.



Obr. 13: Schéma zapojení RSO se statickým buzením

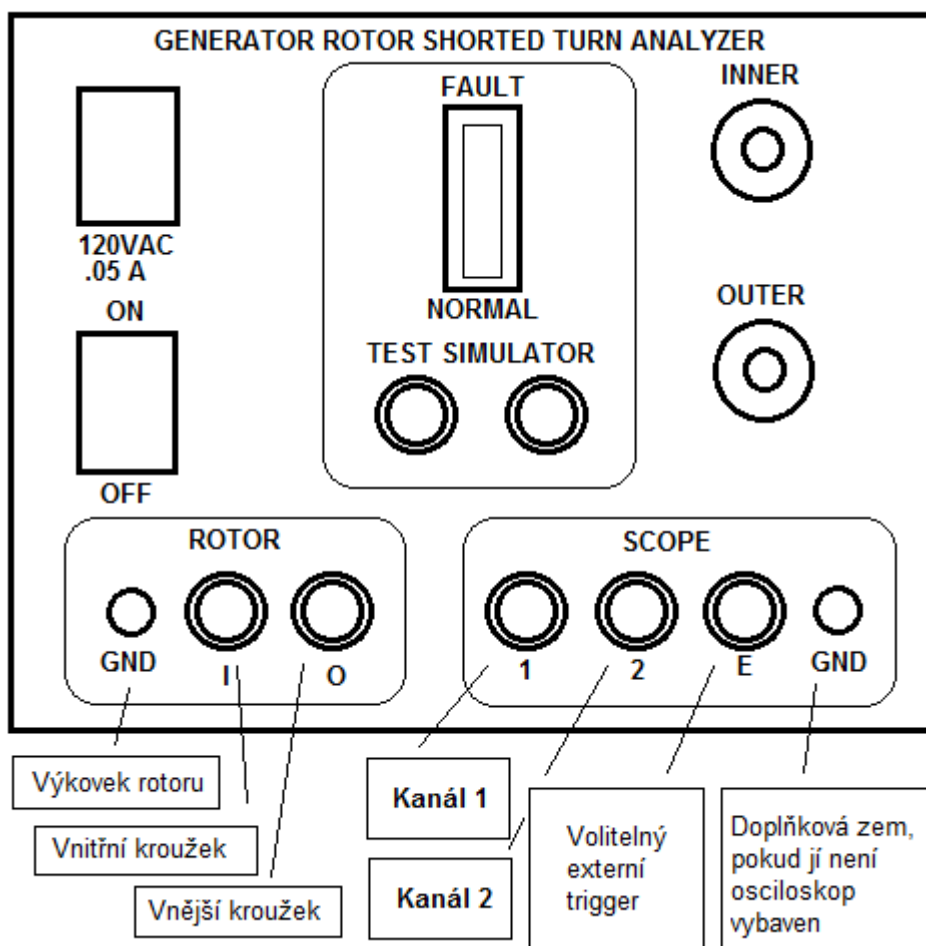
Analyzátor se připojí ke sběracím kroužkům rotoru nebo k vývodům rotoru, pokud jsou kroužky odpojeny od rotoru během opravy, zkoušení nebo výroby, podle obrázku níže (obr. 13). BNC kabely musí mít stejnou délku. Banánový konektor na přístroji označený „GND,“ musí být spojen s tělem nebo výkovkem rotoru, protože měření je vztaženo k potenciálu země. Je třeba se ujistit, že BNC konektor „I,“ je skutečně připojen k vnitřnímu kroužku a BNC konektor „O,“ je připojen k vnějšímu kroužku. Vnitřní kroužek je blíže k tělu rotoru, vnější kroužek je dále od těla rotoru. U rotoru bez kroužků nebo rotorů s jedním kroužkem na straně spojky a jedním na straně vývodů je účelné si vývody označit, např. „I,“ a „O,“ podle konektorů přístroje. Toto označení pak pomůže při hledání místa závady.

Na obrázku výše, je ukázáno zapojení analyzátoru k rotoru se statickým buzením. U rotorů s bezkartáčovým budičem je výstup z rotačního usměrňovače propojen přímo s vinutím rotoru. V takovém případě je potřeba bezkartáčový budič, před začátkem zkoušky, od rotorového vinutí odpojit. V zásadě musí být odpojena veškerá kabeláž připojená k rotorovému vinutí, jinak analyzátor bude měřit nejen vinutí rotoru, ale i všechno, co je k němu paralelně připojeno.

Pro úplnost bude lepší uvést i možnost ověření funkce analyzátoru. Pro tuto variantu je analyzátor vybaven vestavěným testovacím obvodem. Obvod je určen k ověření, že přístroj pracuje správně, pro možnost ukázky měření bez připojení k rotoru a pro ověření, že měřící vodiče jsou neporušené. Po nastavení potenciometrů (INNER a

OUTER) dle postupu nastavení, které má každý analyzátor své specifické, se „Test Switch“, přepne do polohy „Fault,“. Tím by se nám měl na osciloskopu objevit pulz, na začátku součtové křivky, což simuluje vadné vinutí.

Nastavení osciloskopu už je opravdu velmi individuální, ale podstatné pro měření je tedy správné nastavení kanálů. První a druhý kanál slouží jako ukazatelé původních párových signálů, ale nejdůležitější je pro nás matematický kanál. Jedná se o součet obou signálů, kdy jeden je inverzní, neboli se sčítají obrácené signály, abychom byli schopni pozorovat změny a výkyvy na daných signálech. V rámci tohoto měření byl použit osciloskop AGILENT DSOX-3014A.



Obr. 13: Ovládací panel analyzátoru RSO

Samotný průběh měření už je velmi jednoduchý a intuitivní. Při měření se na obrazovce zapnutého osciloskopu objeví dvě stopy měřících kanálů a jedna stopa matematického kanálu. Průběh je možno uložit do paměti osciloskopu a pak je možné ho překopírovat na jakékoliv paměťové médium. Posoudí se shoda průběhu obou kanálů a

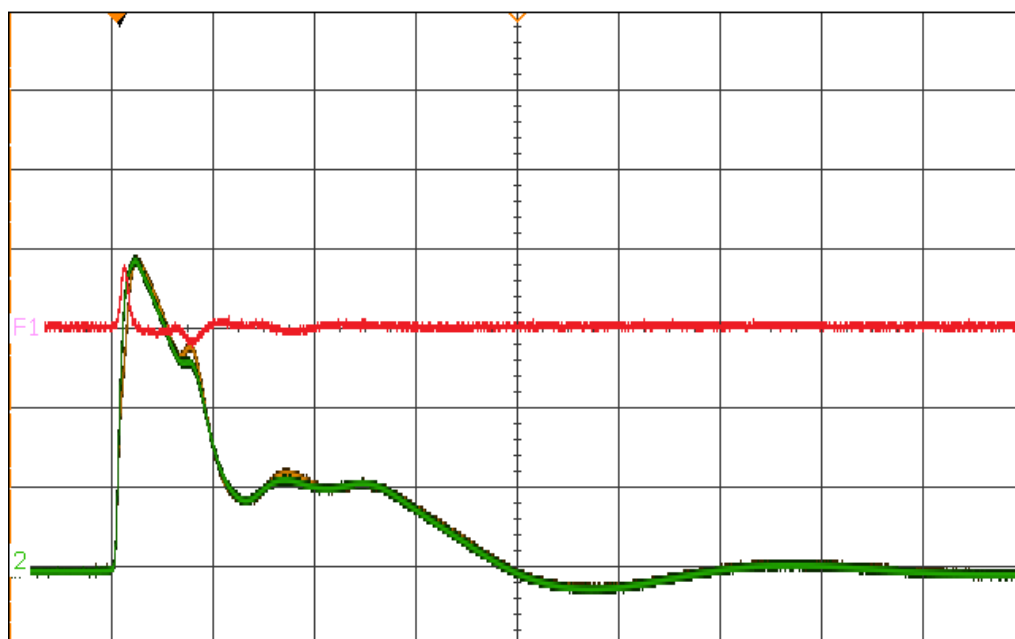
v případě, že je shoda dobrá, je možné konstatovat, že rotor nemá mezizávitové zkratky. Pokud stopy nejsou shodné, lze zvětšit citlivost matematického kanálu a podrobněji ho analyzovat. Z rozmístění a amplitudy jednotlivých impulzů se dá zhruba určit pozice mezizávitových zkratů a kolik závitů je vyzkratováno. Přesnější lokalizace místa mezizávitových zkratů je možná vytvářením umělých zkratů pomocí propojovacího vodiče.

3.2 Vyhodnocení výsledků měření

Měření byla prováděna v montážní hale společnosti BRUSH SEM s.r.o., na rotorech zde vyráběných nebo popřípadě rotorech, které byly po opravě. Jelikož se jednalo o rotory, na kterých by neměla být žádná závada, pro účely tohoto měření byla zvolena cesta simulace mezizávitových zkratů. Bylo použito speciální zařízení, vytvořené pro účely simulace mezizávitového zkratu. Pro snazší manipulaci se jednalo o měděné sondy spojené měděným izolovaným vodičem o maximální délce 50cm, abychom neměli velké zkreslení signálů a docílili jsme požadovaných výstupů. Z důvodu velkého množství výsledků se v této části objeví ty nejvýznamnější průběhy s popisem. V příloze se nachází další část výsledků, které mohou posloužit pro lepší orientaci a pro větší možnost porovnání s jiným měřením.

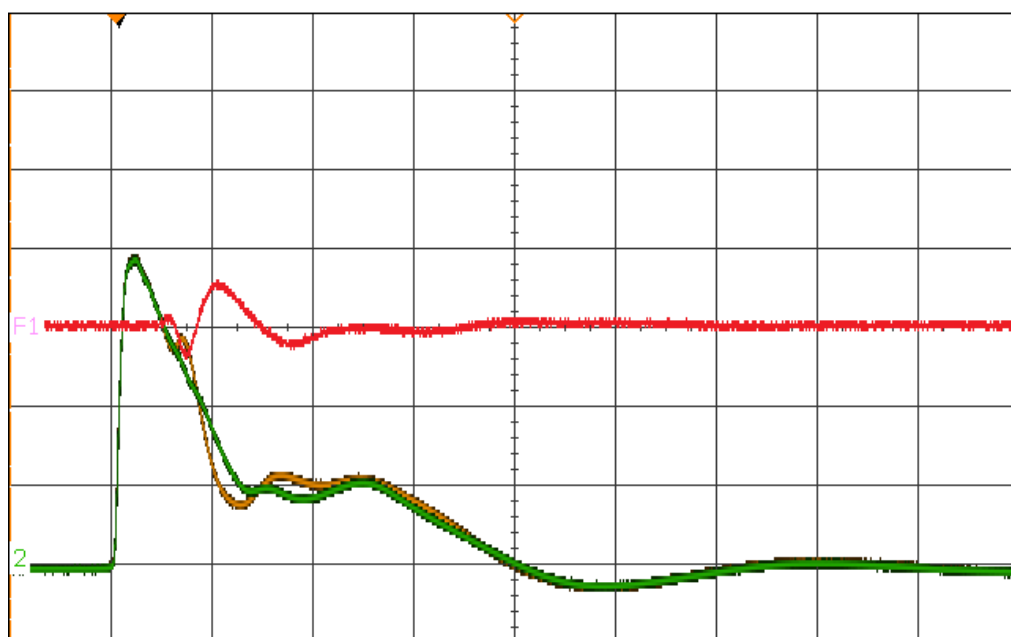
3.2.1 Popis vytváření grafické závislosti

Primárním pokusem bylo zjistit místo daného mezizávitového zkratu pomocí analyzátoru RSO. Pokud bychom tedy uvažovali obecný nový rotor turbogenerátoru, za předpokladu, že nemá žádnou vadu z výroby, musíme si určit počáteční bod na výsledném součtovém signálu. Jedná se tedy o vytvoření umělého zkratu na první cívice nebo poslední cívice, v závislosti na poloze připojených sond a poloze rotoru. Pro představu, pokud budeme mít sondu z kanálu 1 připojenou na první pól a budeme simulovat zkrat na prvním pólu, bude mít její signál větší amplitudu při setkání s druhým signálem, a tudíž bude převládat jeho amplituda i na součtovém kanálu. Pokud bude tedy převládat signál z prvního kanálu, tak se na součtovém kanálu objeví výkyv směrem nahoru, pokud bude převládat signál na druhém kanálu, objeví se na součtovém kanálu výkyv dolů. To znamená, že si tím můžeme určit počátek a konec pro toto měření a jsme schopni z této závislosti vyvodit, zdali je tedy zkrat na prvním nebo na druhém pólu.



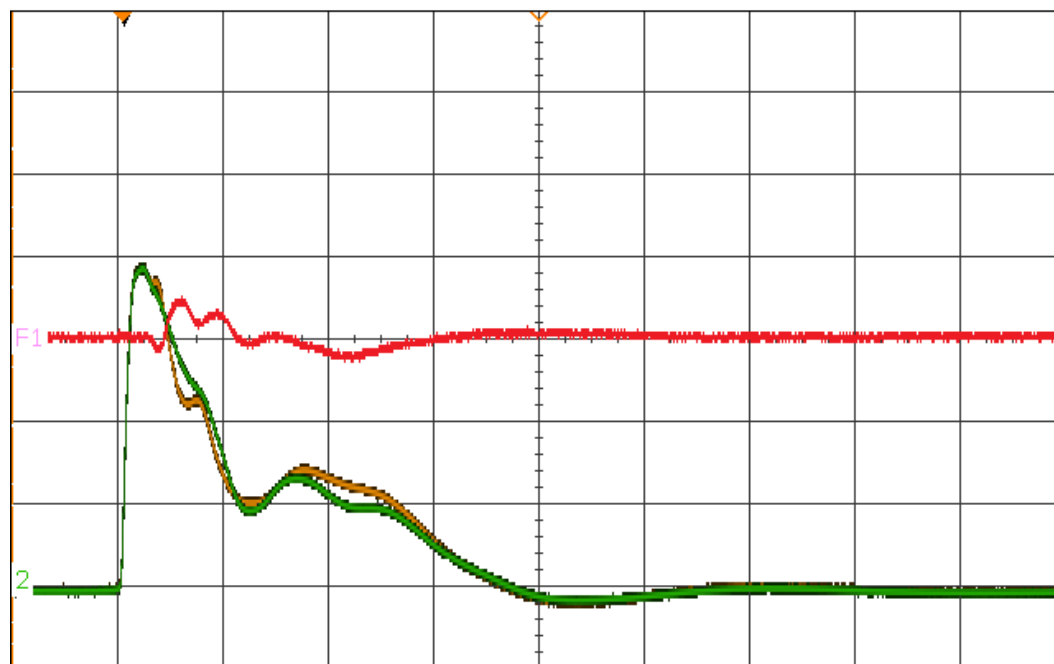
Obr. 14: Grafický výstup měření (zkrat. 1.pól 1. cívka)

Zelenou barvou má signál z kanálu číslo 2, žlutou barvu má kanál číslo 1 a pro nás nejdůležitější součtový matematický kanál má v tomto případě barvu červenou. Jak je na první pohled patrné, výkyv je opravdu nahoru, tudíž se jedná o zkrat na prvním pólu, jelikož byla sonda prvního kanálu připojena na první pól. Zde (Obr. 14) je tedy zkrat na první cívce, abychom si zjistili počátek. Před tímto výkyvem se nemůže nacházet žádný jiný, jelikož před touto cívkou už není žádné další vinutí, kde by se mohl zkrat nacházet.



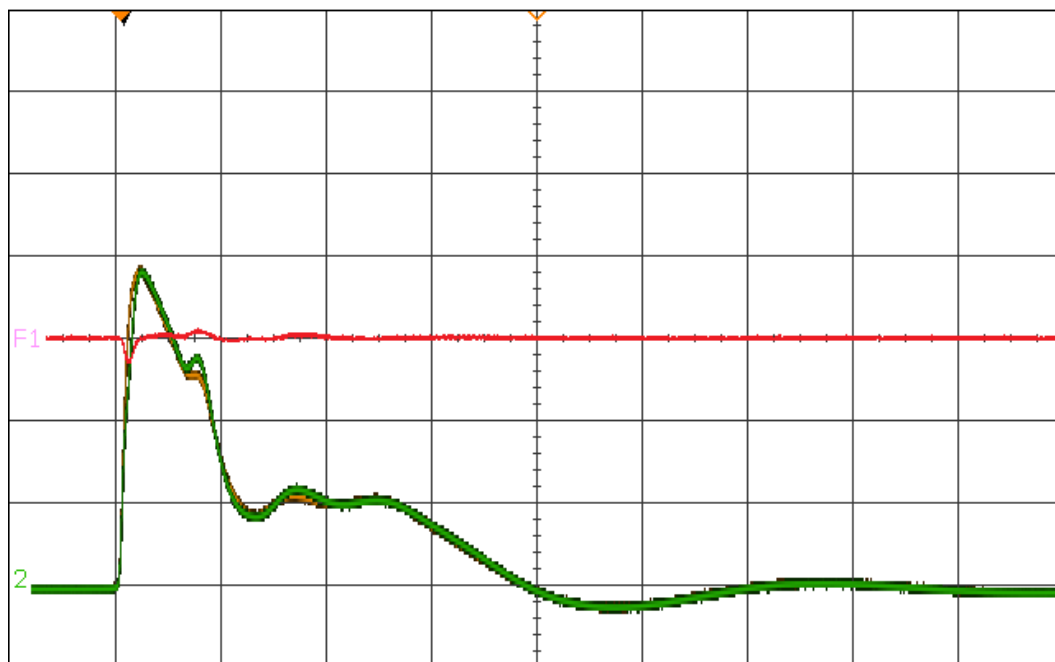
Obr. 15: Grafický výstup měření (zkrat. 1.pól 6. cívka)

Abychom byli schopni tedy určit polohu zkratu, musíme vědět, kde se nachází i pro nás pomyslný konec měření, fyzický druhý konec vinutí. Na grafu výše (Obr. 15) je tedy patrný výkyv nahoru, a je posunutý doprava oproti výsledku, když byl zkrat na první cívce. Zde se tedy zkrat nacházel na šesté, konečné, cívce daného pólu. Tudíž jakýkoliv jiný zkrat na tomto pólu, by se měl objevit mezi počátkem druhého a třetího dílku.



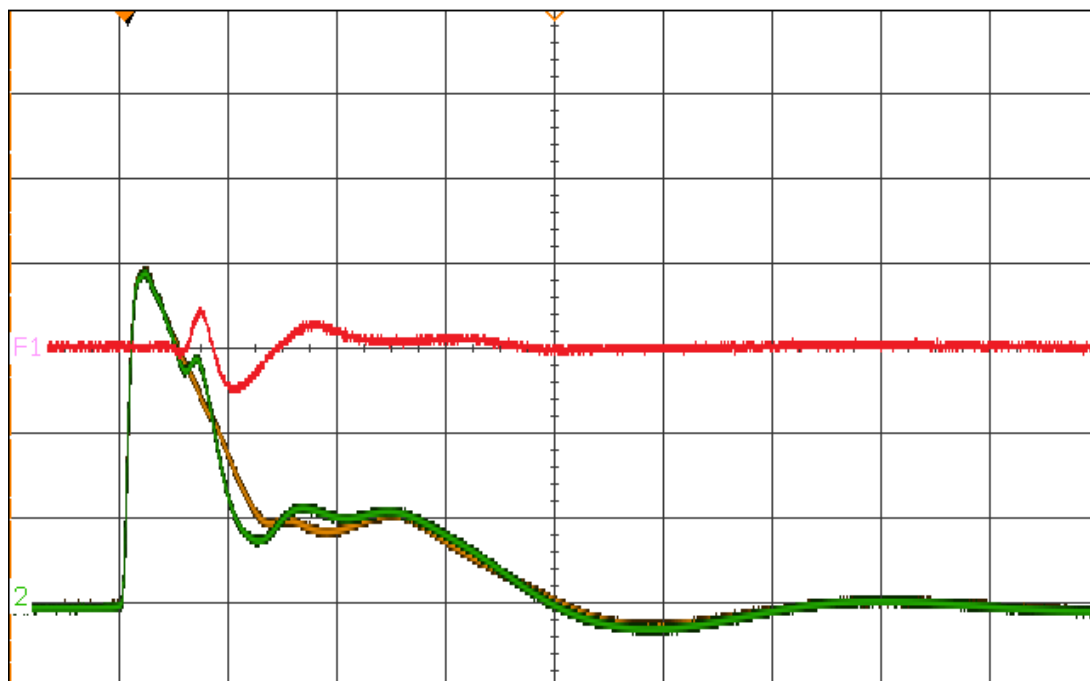
Obr. 16: Grafický výstup měření (zkrat. 1.pól 4. cívka)

Na tomto grafu (Obr. 16) je tedy patrné, že se daný zkrat nachází mezi polohou zkratu na první cívce a poslední. Takže je ověřena poloha graficky. V praxi jsme zkrat nasimulovali na čtvrté cívce pro přesnost. Dalším důležitým faktem, který je vidět na tomto grafu, je následné zvlnění způsobené setkáním signálů. Proto se pozorovatel musí soustředit pouze na výkyv s největší amplitudou, popřípadě sledovat i oba signály zvlášť, aby byl schopen určit, zdali se jedná o následné zvlnění, nebo zdali se nejedná o další zkrat v jiném místě. Je tedy důležité při měření sledovat i závislosti průběhů signálu na výsledný součtový kanál, jinak může dojít k zanedbání chyby, popřípadě špatné dedukci, a dané měření je pro nás prakticky nepoužitelné.



Obr. 17: Grafický výstup měření (zkrat. 2.pól 1. cívka)

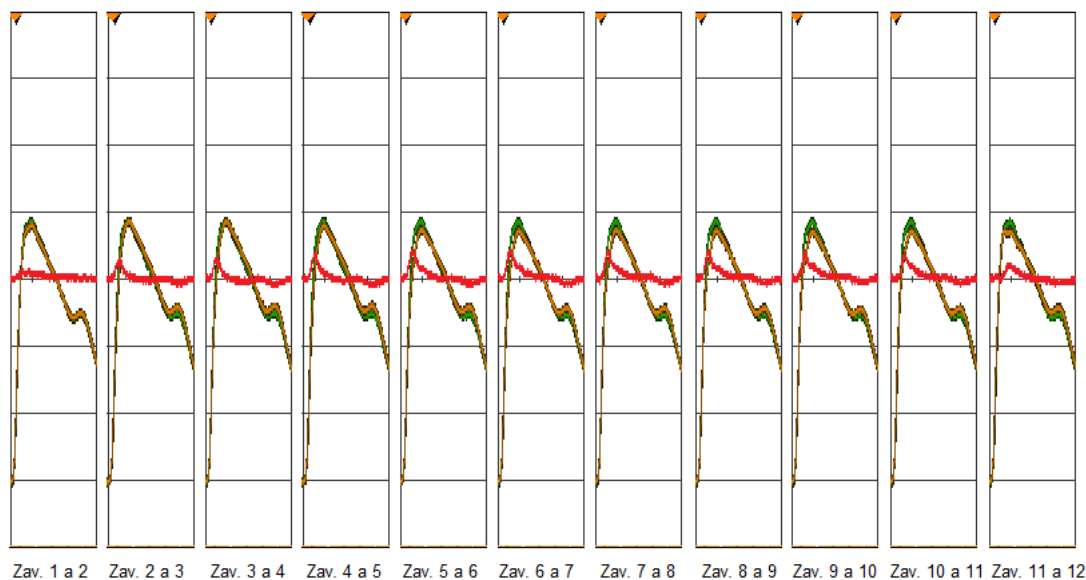
Pro úplnost (Obr. 17) je zde i graf, jak se chová součtový kanál, pokud se tedy pohybujeme na druhém (opačném) pólu, oproti předchozímu. Je tedy patrné, že výkyv směřuje dolů a nemá ani velkou amplitudu, tudíž se jednalo o zkrat mezi dvěma závitů na první cívce druhého pólu. Aby bylo možné porovnání, na obrázku níže (Obr. 18), je tedy nasimulován zkrat opět na druhém pólu, ale na šesté cívce.



Obr. 18: Grafický výstup měření (zkrat. 2.pól 6. cívka)

3.2.2 Výstup z měření mezizávitových zkratů na jedné cívce

Dalším postupem bylo zvoleno proměření jedné cívky, při kterém se postupně simuloval mezizávitový zkrat na dvou po sobě jdoucích závitích. Z tohoto měření už bohužel bylo patrné, že detekování zkratu s určením přesné polohy, jak na cívce tak i závitů, nebude proveditelné.



Obr. 19: Výřezy z grafických výstupů

Na těchto výstupech z měření, jedná se tedy o výřezy druhého dílku z grafického výstupu osciloskopu, je vidět, jak hodně malá je změna amplitudy. Na prvním výřezu je tedy průběh zkratu mezi prvním a druhým závitěm od těla rotoru. Ten má nejmenší amplitudu, nejvyšší amplituda by podle všeho měla být, když se dané signály setkají ve stejném místě, což polohou odpovídá zhruba zkratu mezi 6. a 7. závitěm, kdy je patrná nejvyšší amplituda. Sice se nedá určit přesná poloha zkratu z polohy výkyvu, ale z jeho amplitudy se dají vyvodit určité výsledky. Je viditelná změna amplitudy, nejdříve rostoucí, pokud se zkrat blíží ke středu cívky, a poté klesající, jakmile se zkrat blíží k vnějším závitům dané cívky. Opět lze z toho vyvodit výsledek, který už nám napovídá, jak postupovat při lokalizaci. Musíme si tedy nasimulovat zkrat mezi prvním a druhým závitěm a po-té si nasimulovat zkrat mezi předposledním a posledním závitěm, tím si určíme vztažné amplitudy. Pak nám chybí středový bod. Provedeme tedy simulaci zkratu na prostředních dvou závitěch, a tím bychom měli objevit bod, ve kterém má daný průběh amplitudu nejvyšší. Pozorováním by pak mělo být možné stanovit přesnější polohu, na kterém závitě tedy daný zkrat je.

Bohužel, jak je patrné z předchozího textu, nelze samozřejmě měřit na již poškozeném vinutí, jelikož bychom měli detekovány i tyto zkraty, a tím bychom měli ovlivněn celý grafický výstup. Musí se tedy postupně sestavovat tabulka měření, která by obsahovala proměřené všechny závity jednotlivých cívek rotoru. Tento postup je samozřejmě poměrně časově náročný, jelikož se může jednat o pět až dvacet závitů na deseti cívkách.

4 Závěr

Závěrem je možno zdůraznit určité aspekty dané problematiky a co z ní vyplývá pro nové či současné uživatele tohoto analyzátoru. Měření lze považovat za časově nenáročné, pokud se nejedná o tvorbu měřicího záznamu pro budoucí detekování. Samotné zařízení lze používat prakticky kdekoliv, jelikož se nejedná o nikterak složité zařízení na prostor ani přípravu. Problém nám ovšem nastává v samotné detekci mezizávitového zkratu. Tato metoda je již léty ověřena, že lze použít na určení cívký, na které se nachází zkrat, bohužel pro detekci konkrétního závitů, se v tomto stavu nedá použít. Tak jemné odlišnosti v amplitudách a rozdílech polohy, se pouhým okem dost často ani nedají postřehnout. Dalším postupem by tedy mohlo být přestavění samotného analyzátoru, abychom využívali vyšší hodnoty amplitudy, ale stále byla zaručena bezpečnost personálu, který na zařízení může pracovat anebo na daném rotoru zakázat v průběhu měření jakékoliv manipulace. Nyní se jedná o hodnotu od 5 do 15 V, při dvojnásobné amplitudě se domnívám, že mohly být tyto změny už daleko patrnější a stále bychom neměli být schopni tímto měřením poškodit izolaci vinutí. Tím by bylo možné docílit zvýraznění rozdílů amplitud jednotlivých zkratů, a možná i vytvořit možnost detekce těchto zkratů z grafických výstupů. Dalším možným řešením je vytvořením matematického modelu pro tuto problematiku. To by znamenalo celé vinutí si představit jako simulaci vedení, a tím pádem řešit matematický model šíření vlnění na vedení. Pokud tedy nebudeme chtít jakkoliv zasahovat do analyzátoru, je zde možnost vytvářet katalog měření. V něm by se tedy nacházely grafické výstupy ze simulací mezizávitových zkratů jednotlivých nových rotorů. Při jejich opravě se pak může tento katalog využít jako vodítko k detekování zkratů.

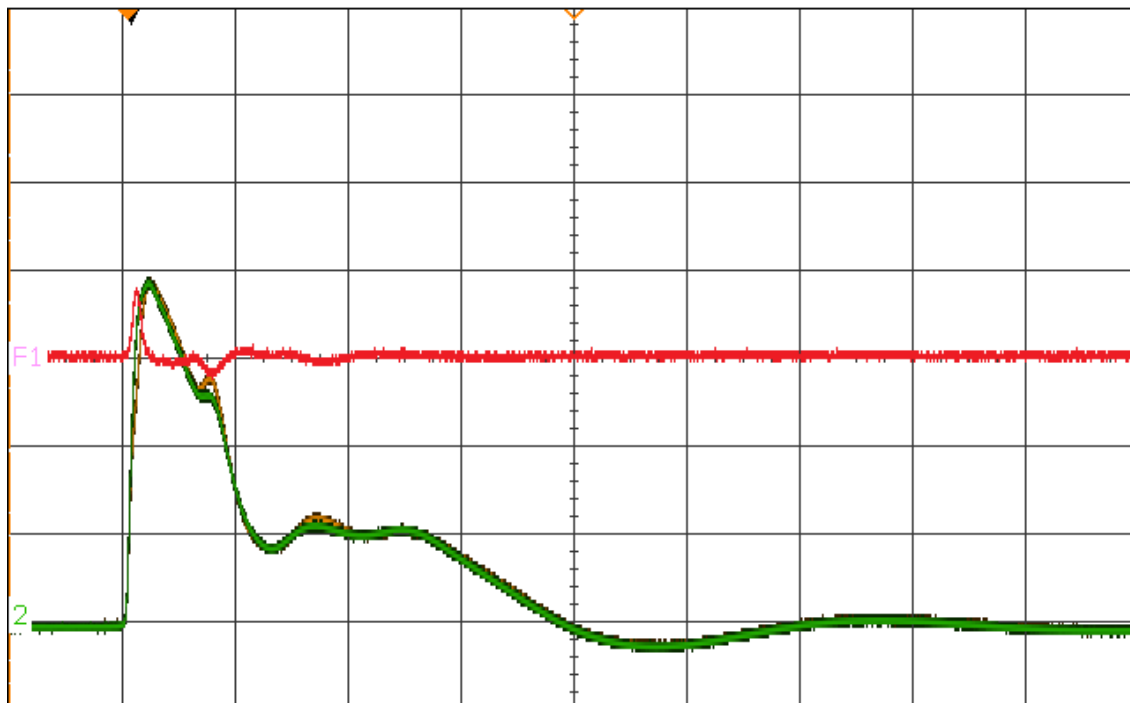
Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Electrical Insulation for Rotating Machines, Greg C. Stone, E. A. Boulter, I. Culbert, H. Dhirani, IEEE, USA 2004
- [2] Utilization of Repetitive Surge Oscillograph (RSO) in the Detecion fo Rotor Shorted-Turns in Large Turinbe-Driven Gnerators, Isidor Kerzenbaum and Clyde Maughan,

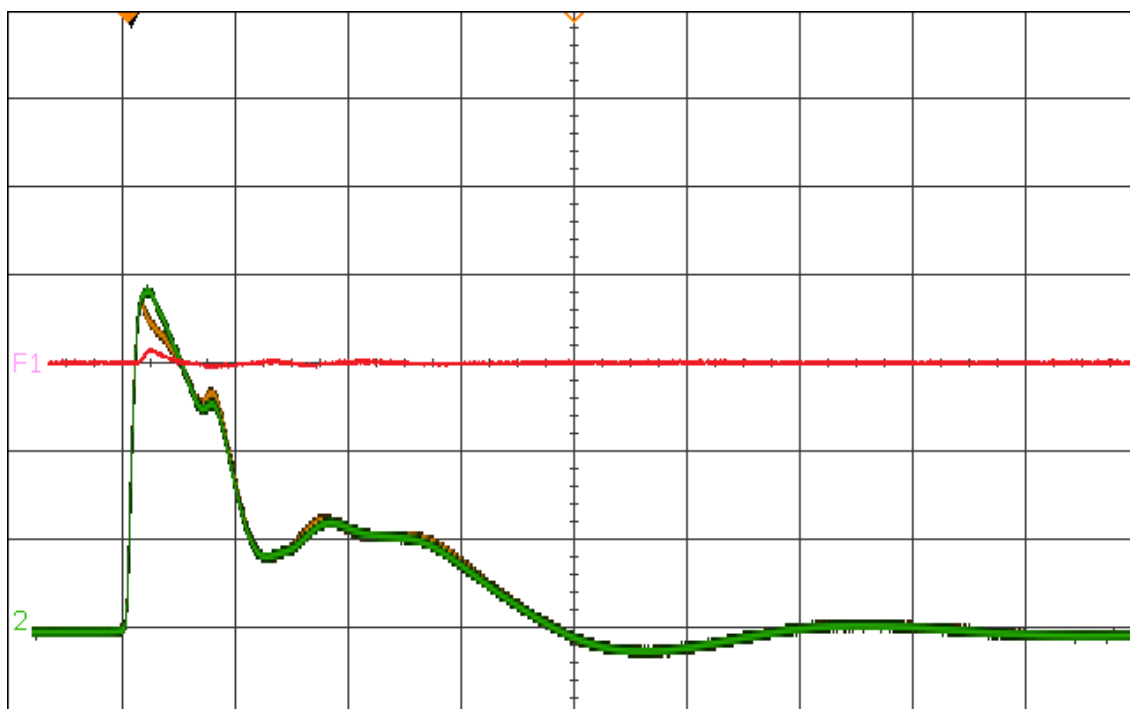
Přílohy

Měření na určení cívky se zkratem:

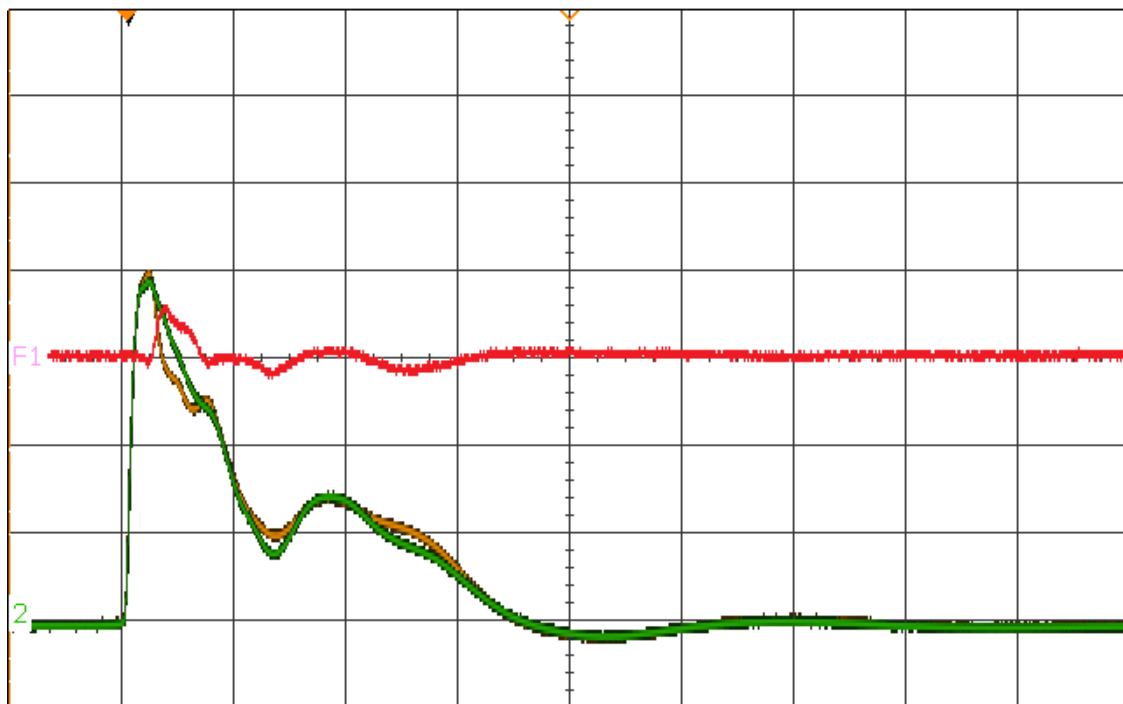
1. pól:



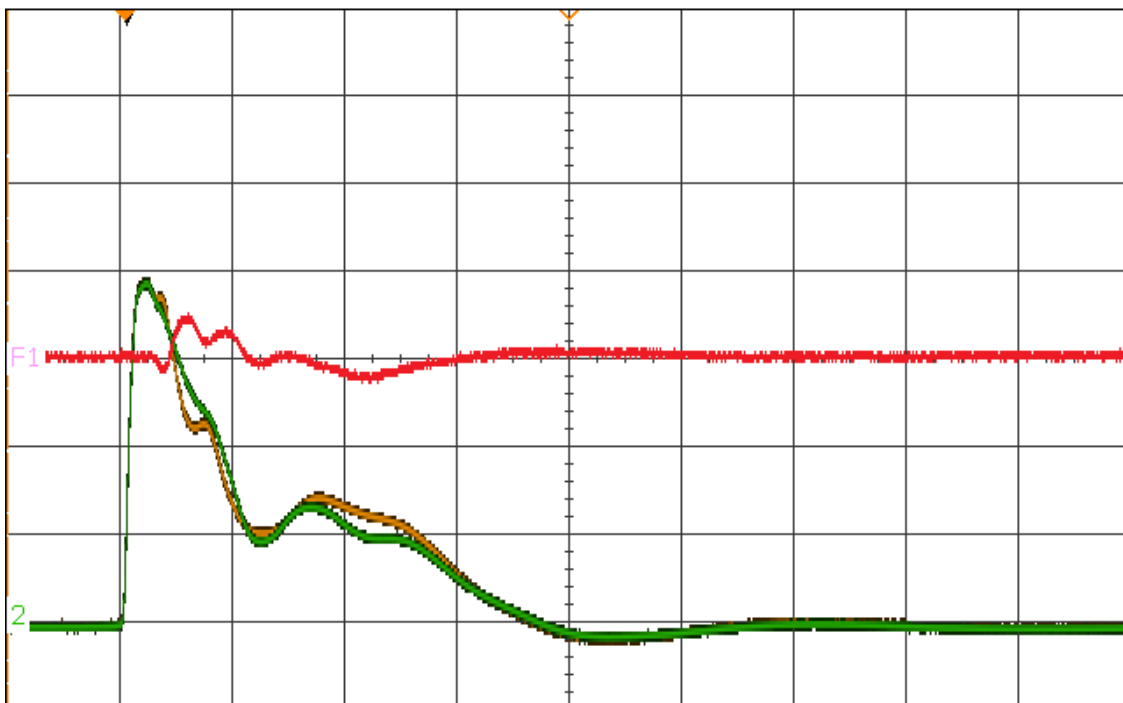
Obr. 1: Zkrat na první cívce



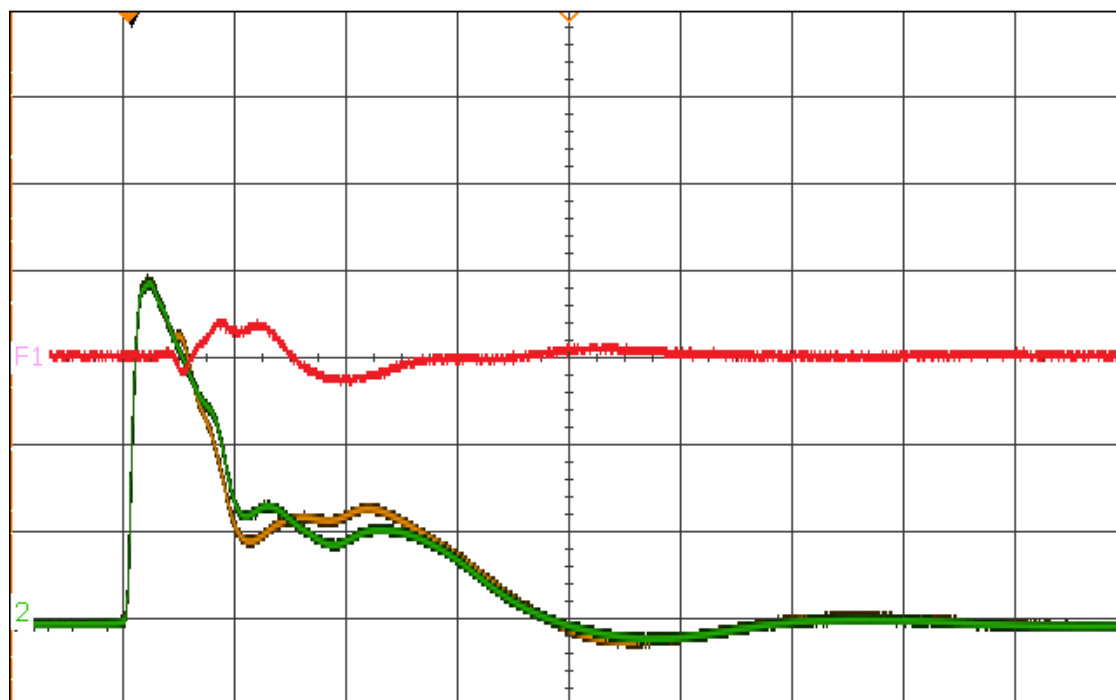
Obr. 2: Zkrat na druhé cívce



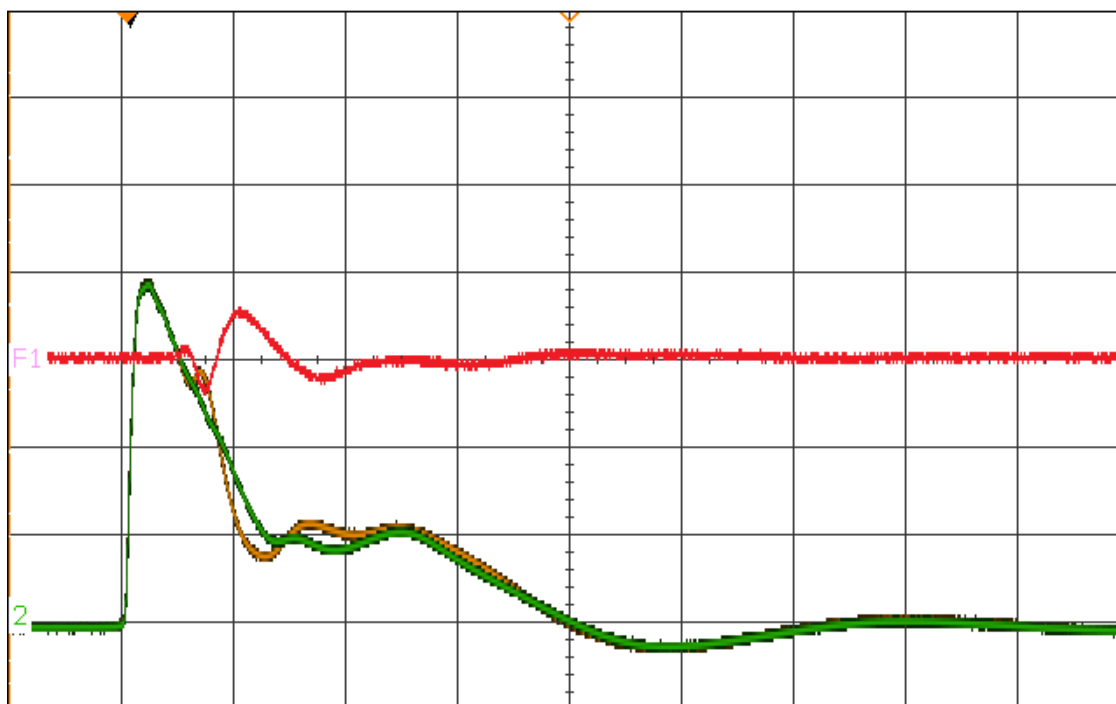
Obr. 3: Zkrat na třetí cívce



Obr. 4: Zkrat na čtvrté cívce

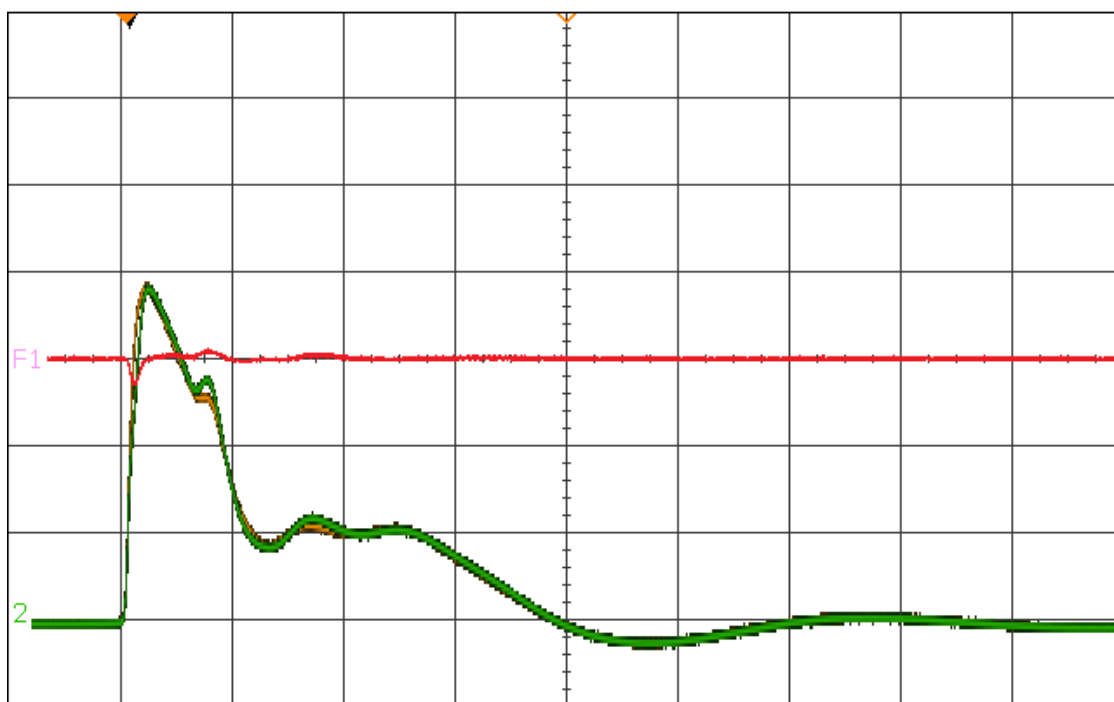


Obr. 5: Zkrat na páté cívice

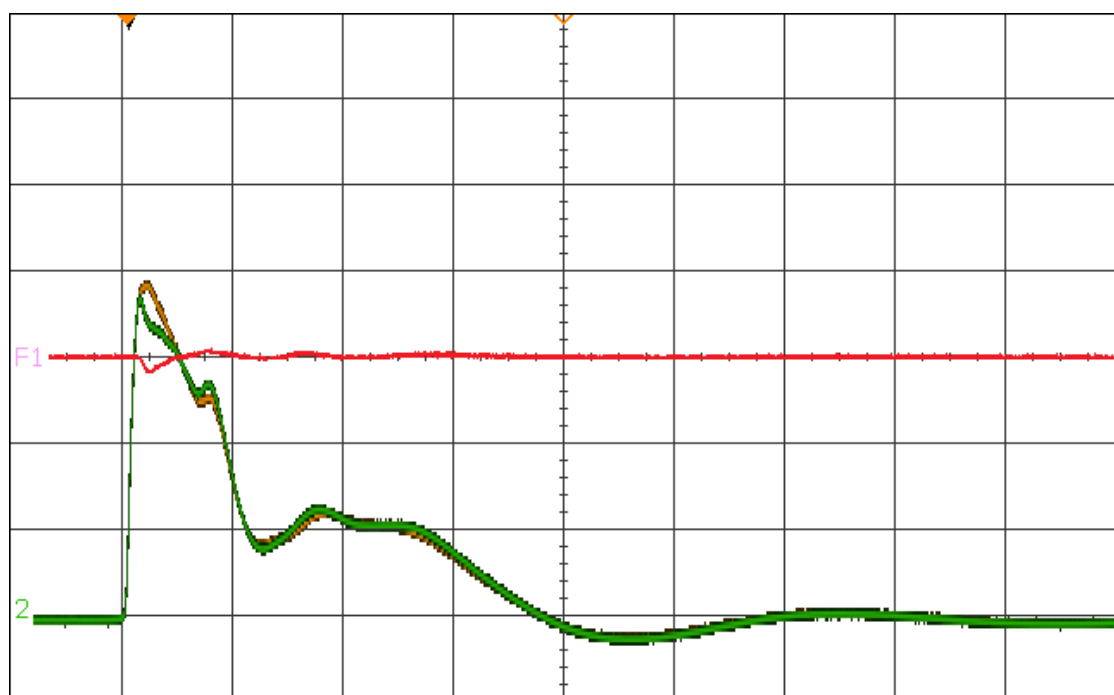


Obr. 6: Zkrat na šesté cívice

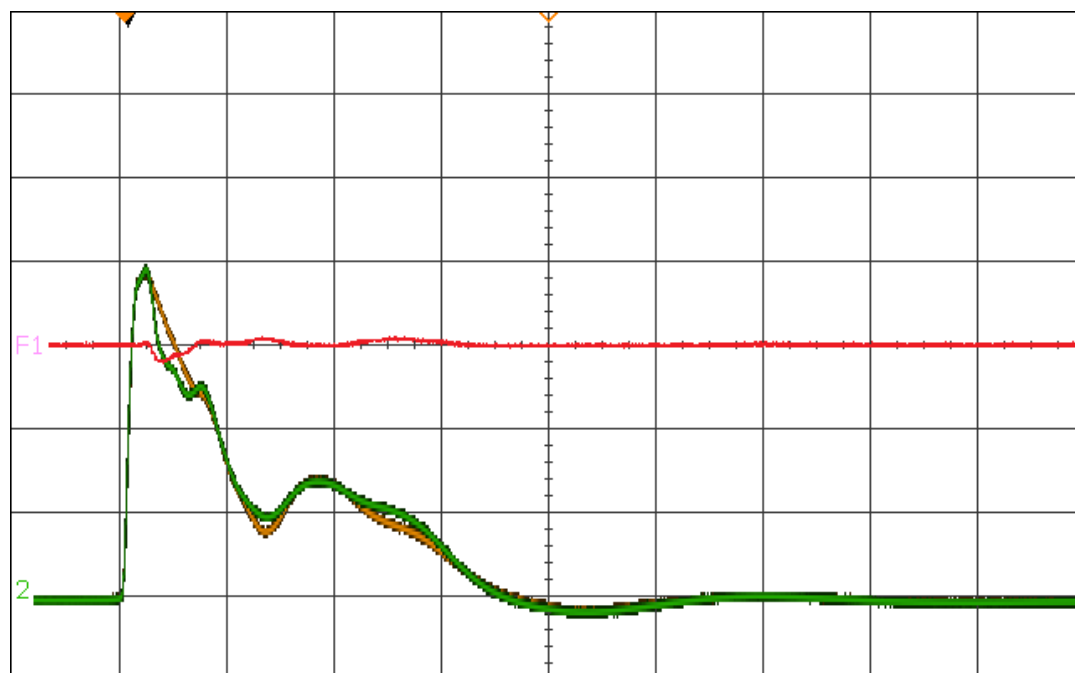
2. pól:



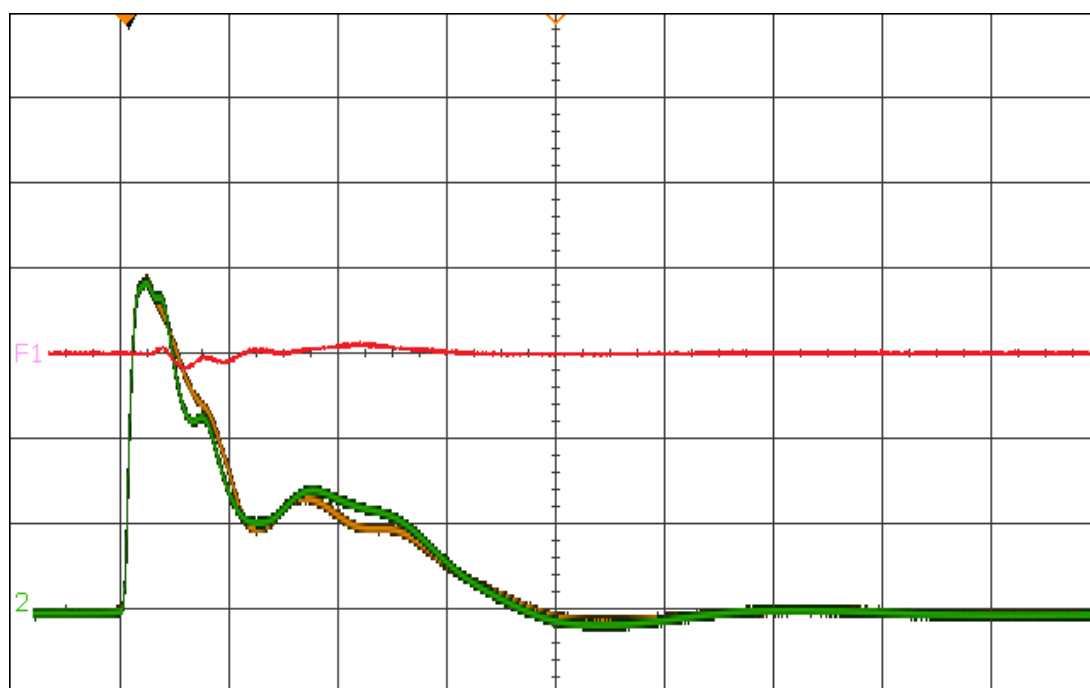
Obr. 7: Zkrat na první cívce



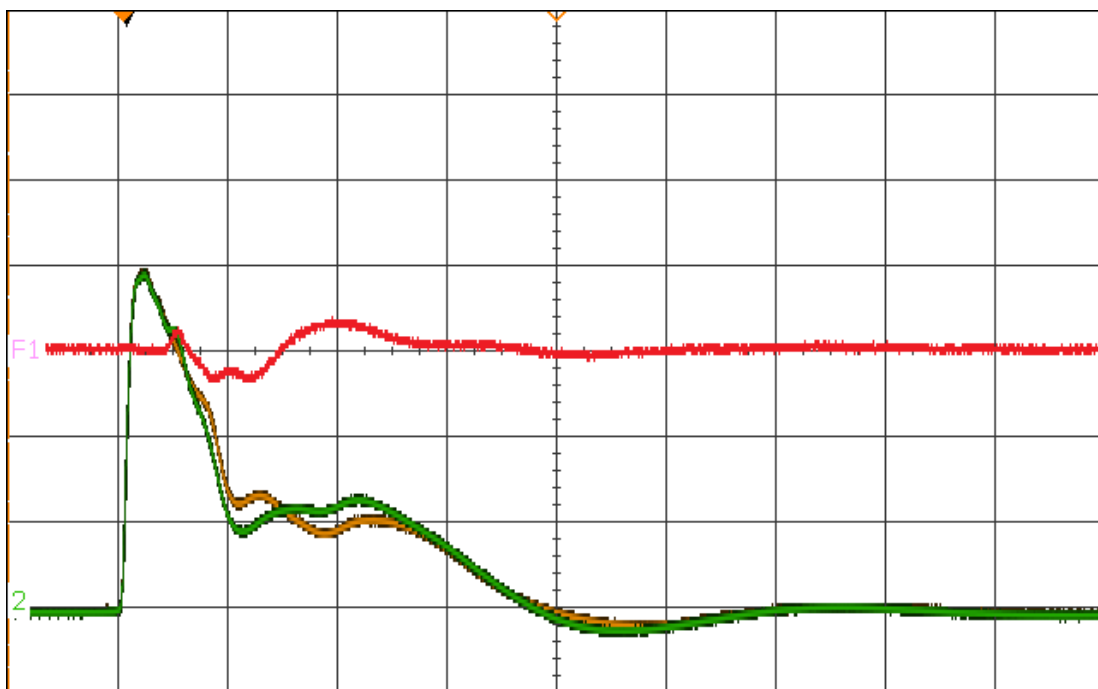
Obr. 8: Zkrat na druhé cívce



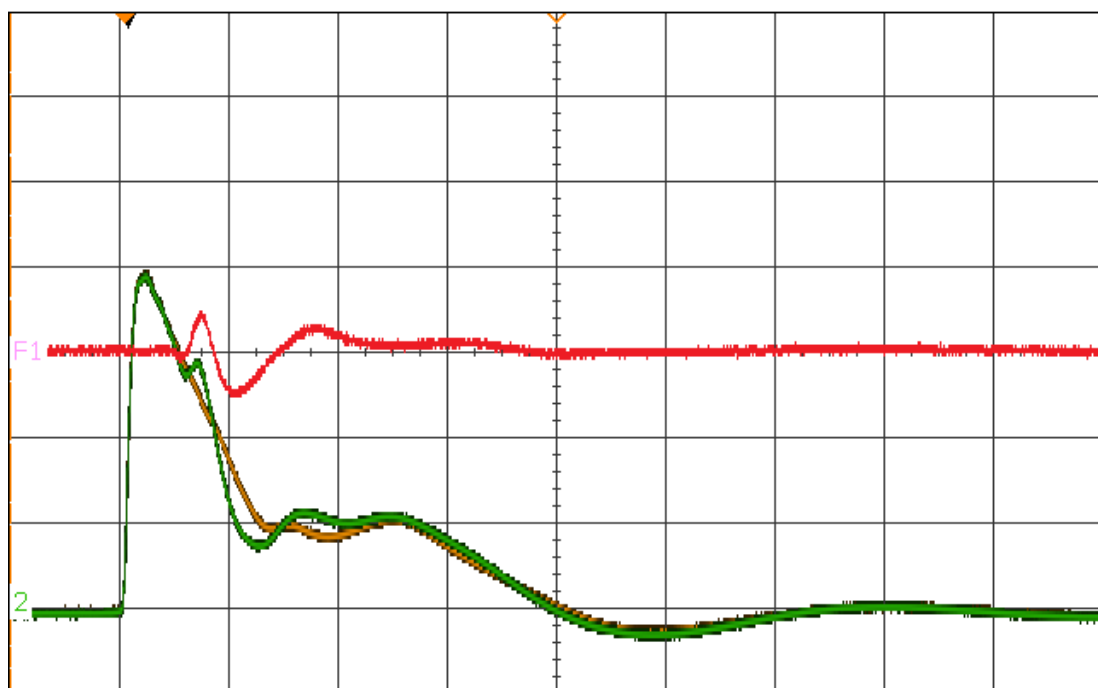
Obr. 9: Zkrat na třetí cívice



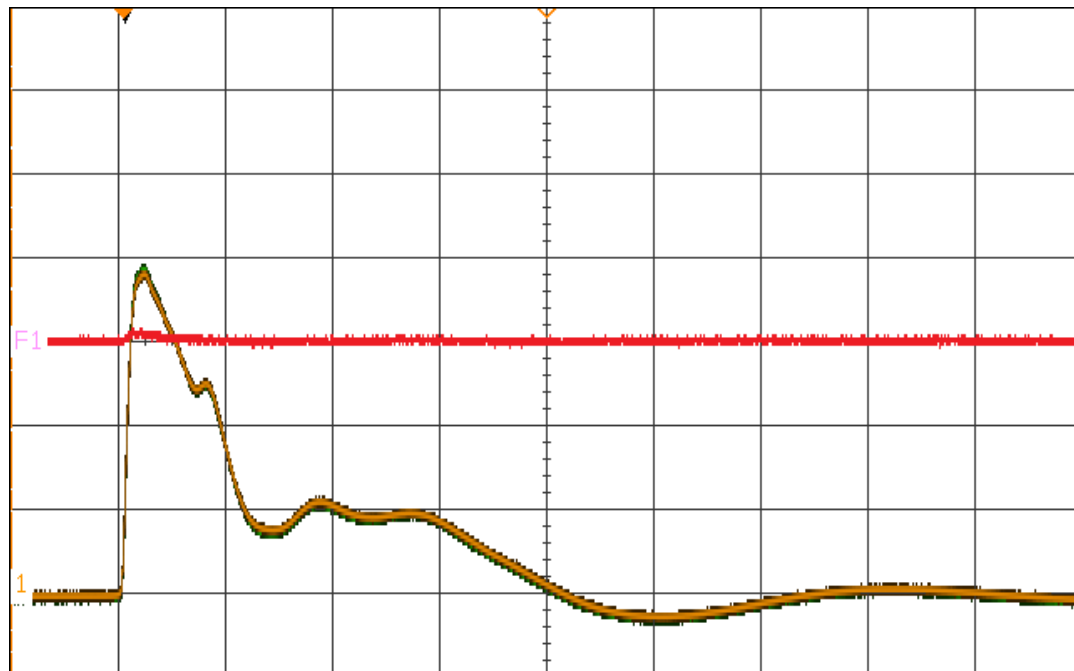
Obr. 10: Zkrat na čtvrté cívice



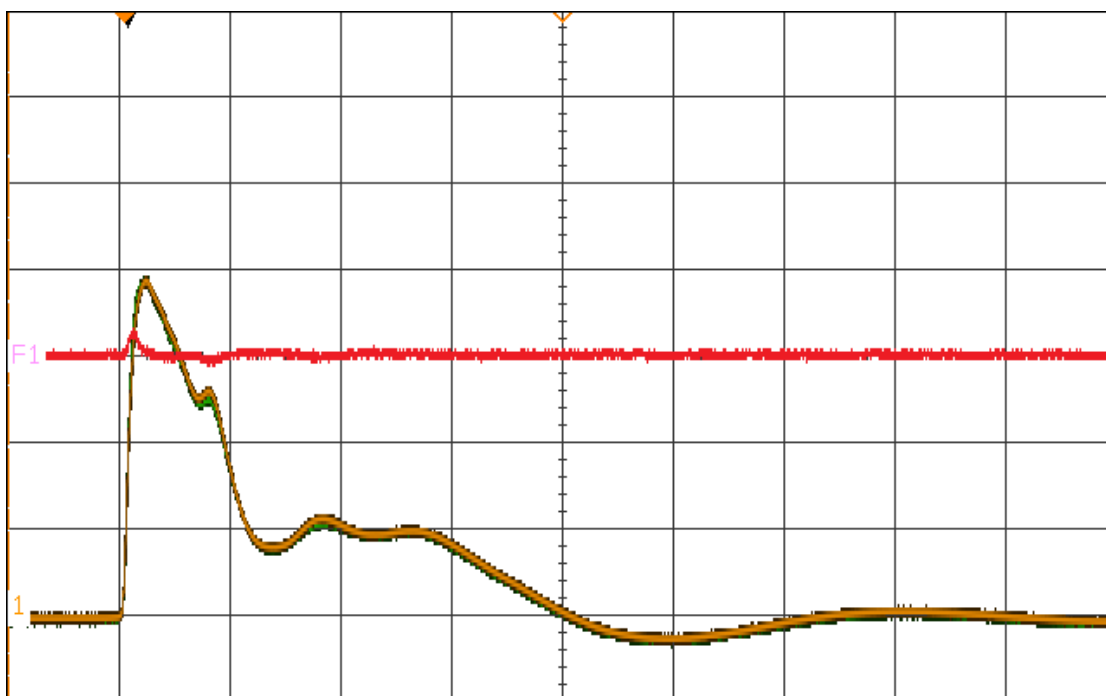
Obr. 11: Zkrat na páté cívce



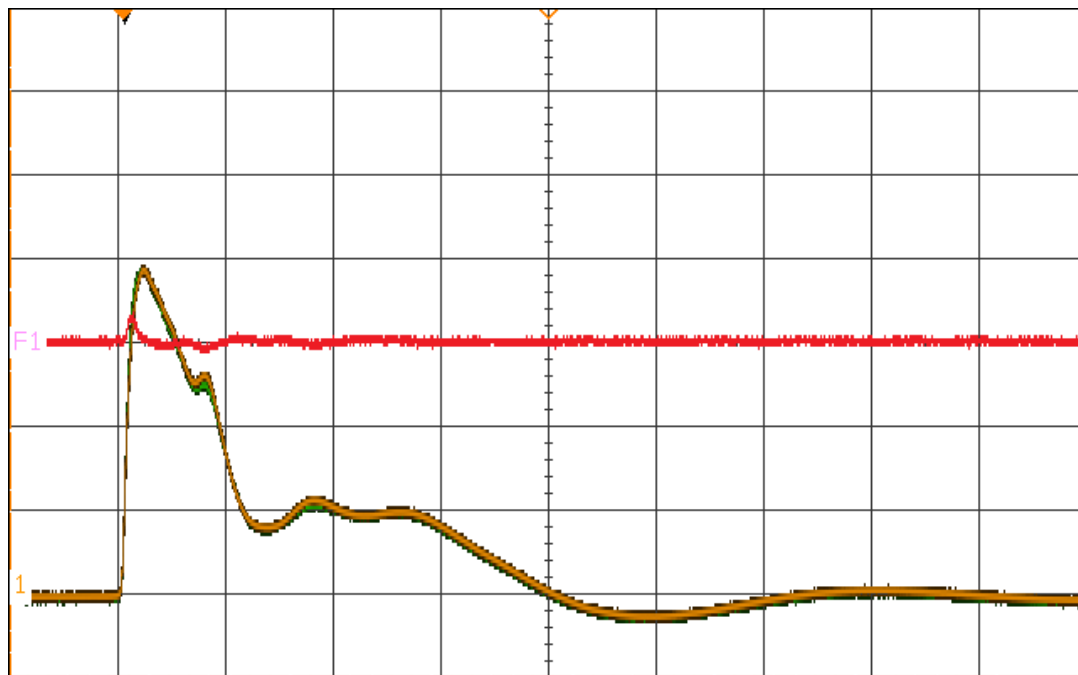
Obr. 12: Zkrat na šesté cívce

Měření na určení závitu se zkratem:**První cívka:**

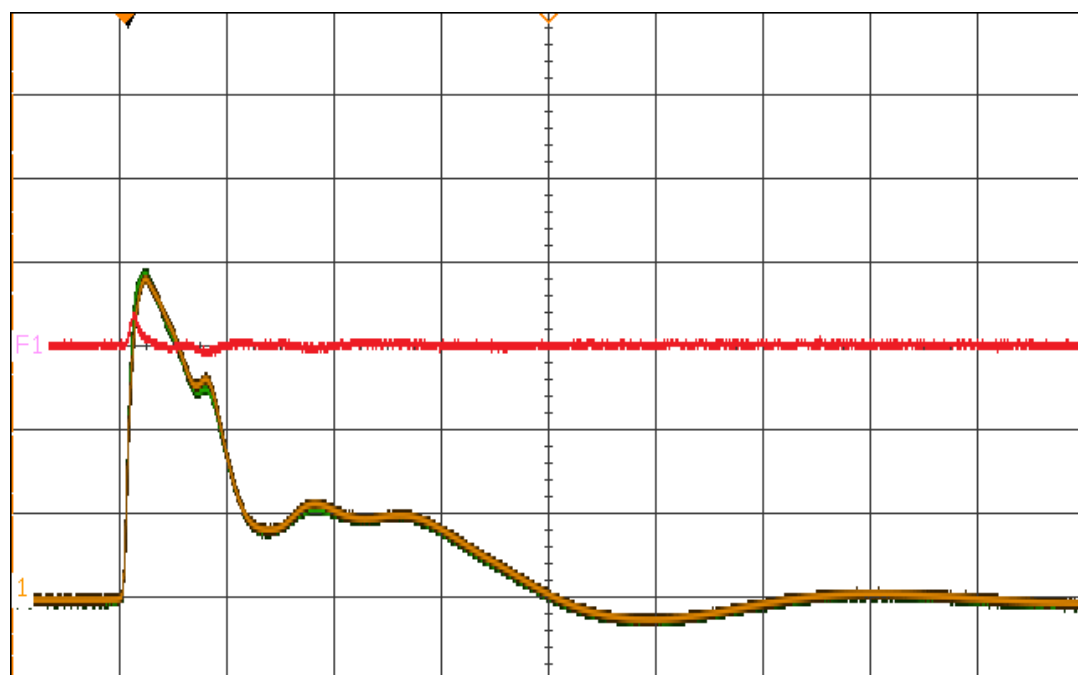
Obr. 13: Simulovaný zkrat mezi 1. a 2. závitem



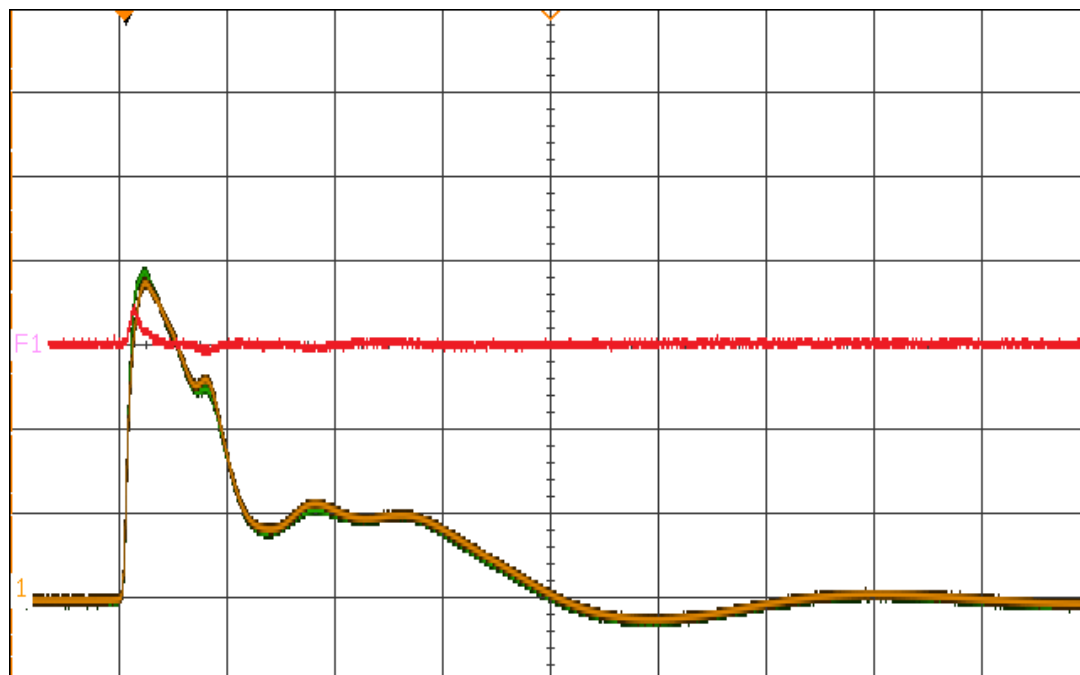
Obr. 14: Simulovaný zkrat mezi 2. a 3. závitem



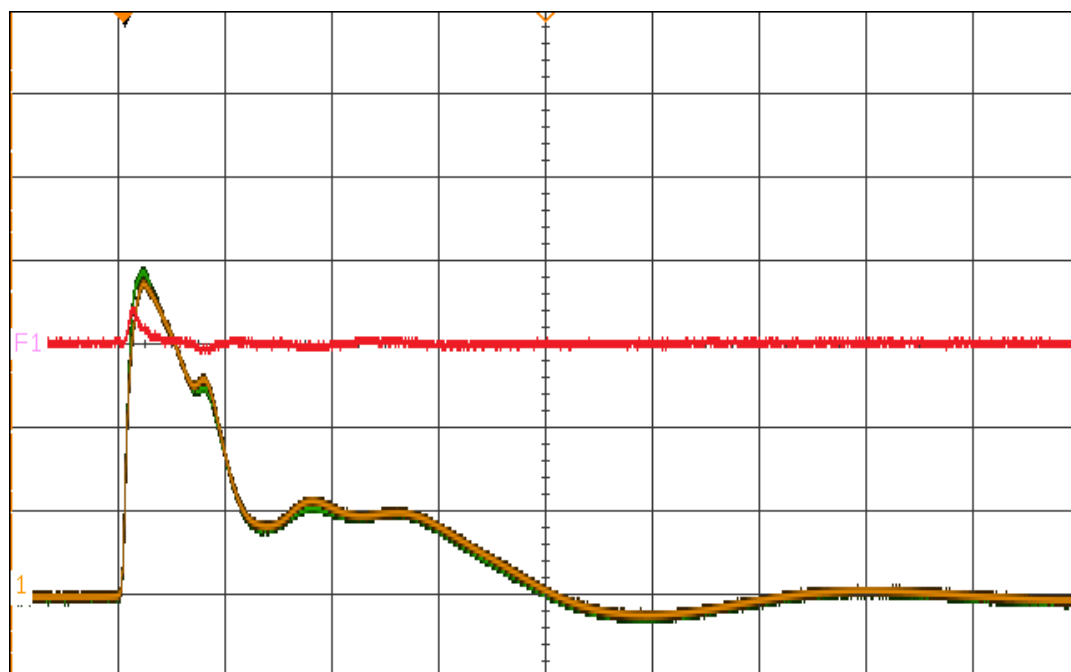
Obr. 15: Simulovaný zkrat mezi 3. a 4. závitem



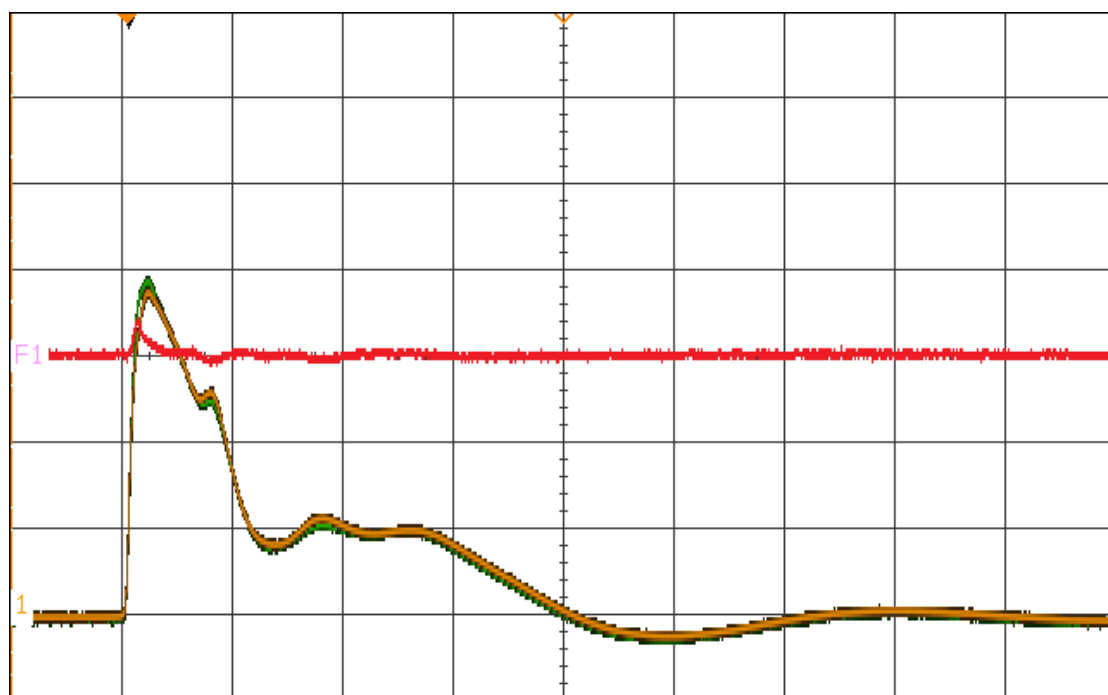
Obr. 16: Simulovaný zkrat mezi 4. a 5. Závitem



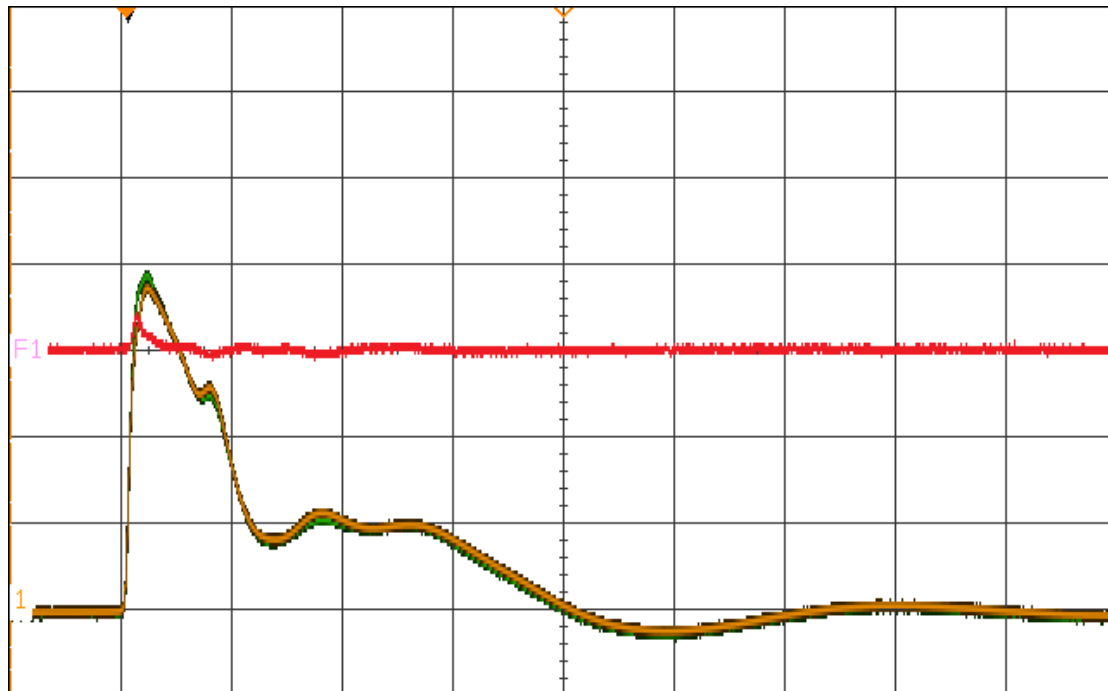
Obr. 17: Simulovaný zkrat mezi 5. a 6. závitem



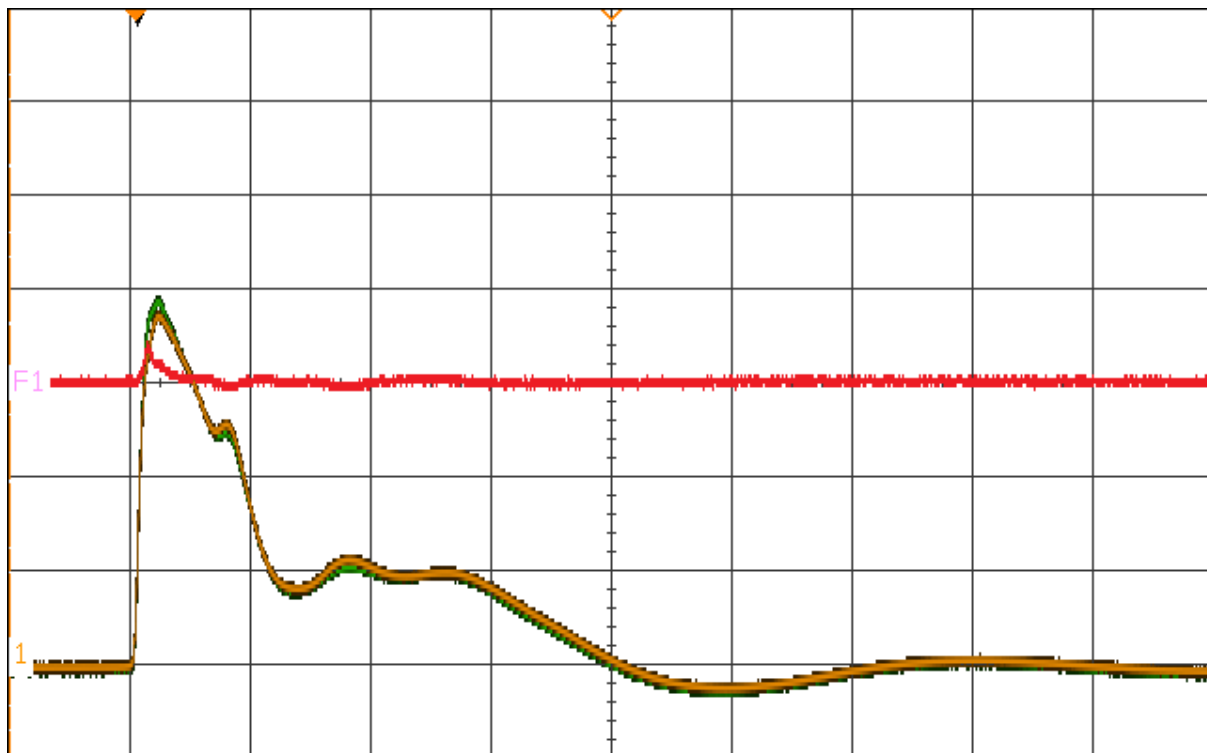
Obr. 18: Simulovaný zkrat mezi 6. a 7. závitem



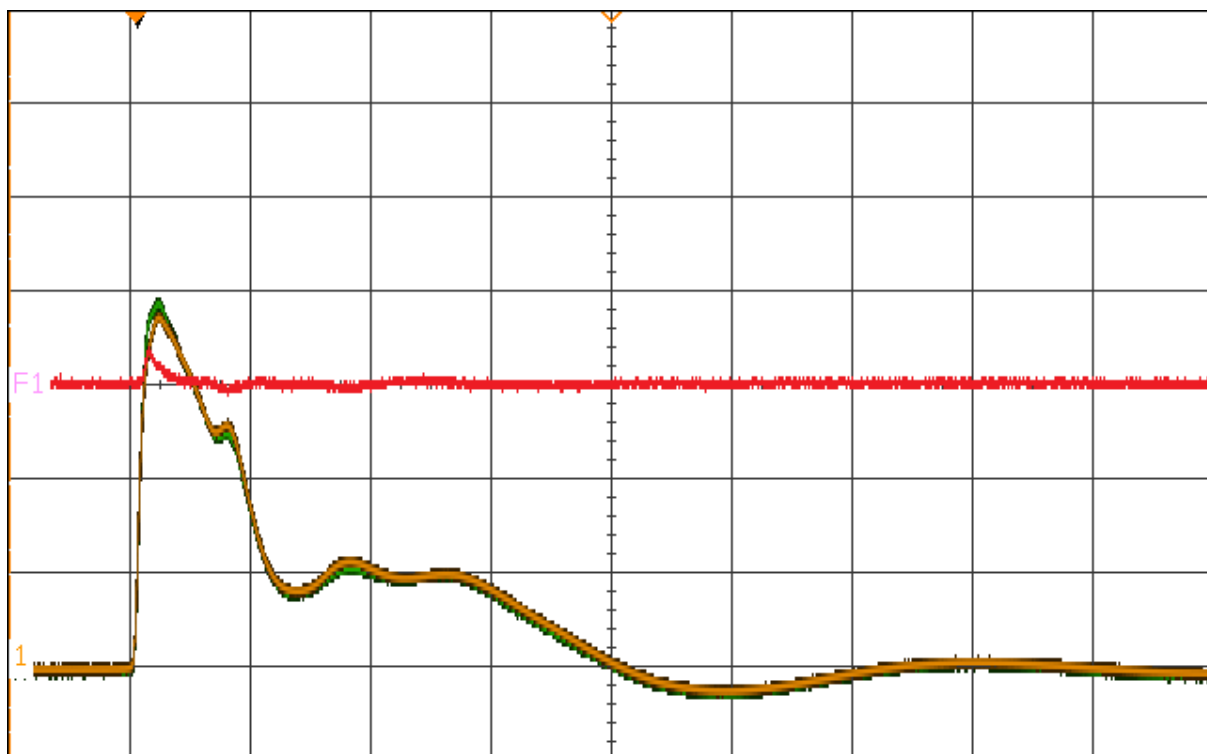
Obr. 19: Simulovaný zkrat mezi 7. a 8. závitem



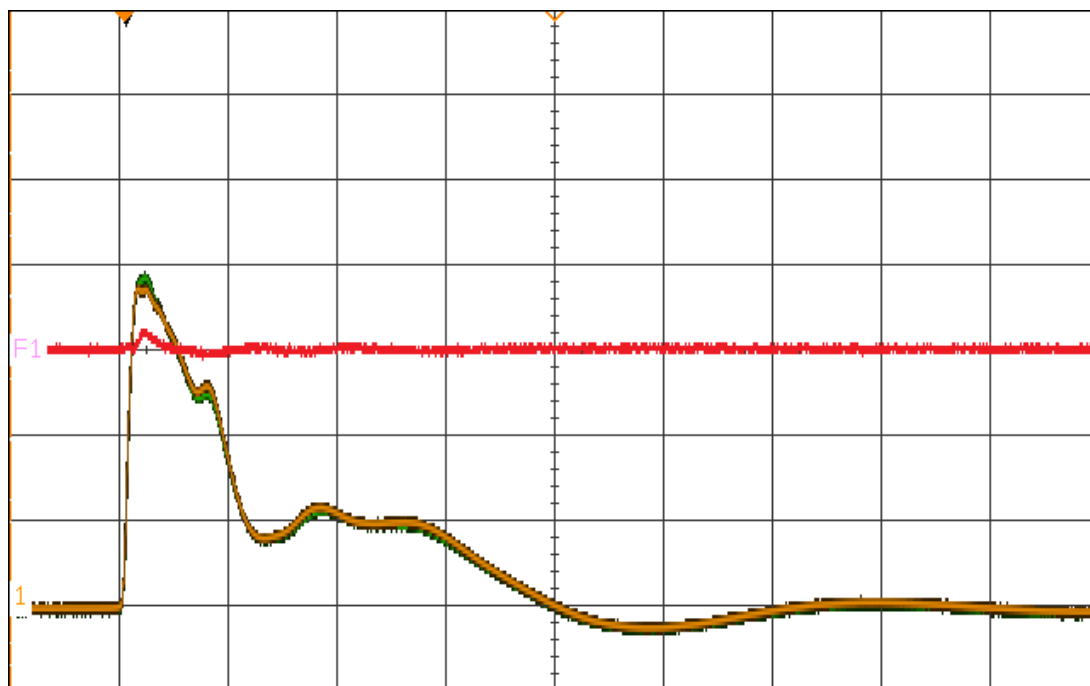
Obr. 20: Simulovaný zkrat mezi 8. a 9. závitem



Simulovaný zkrat mezi 9. a 10. závitem

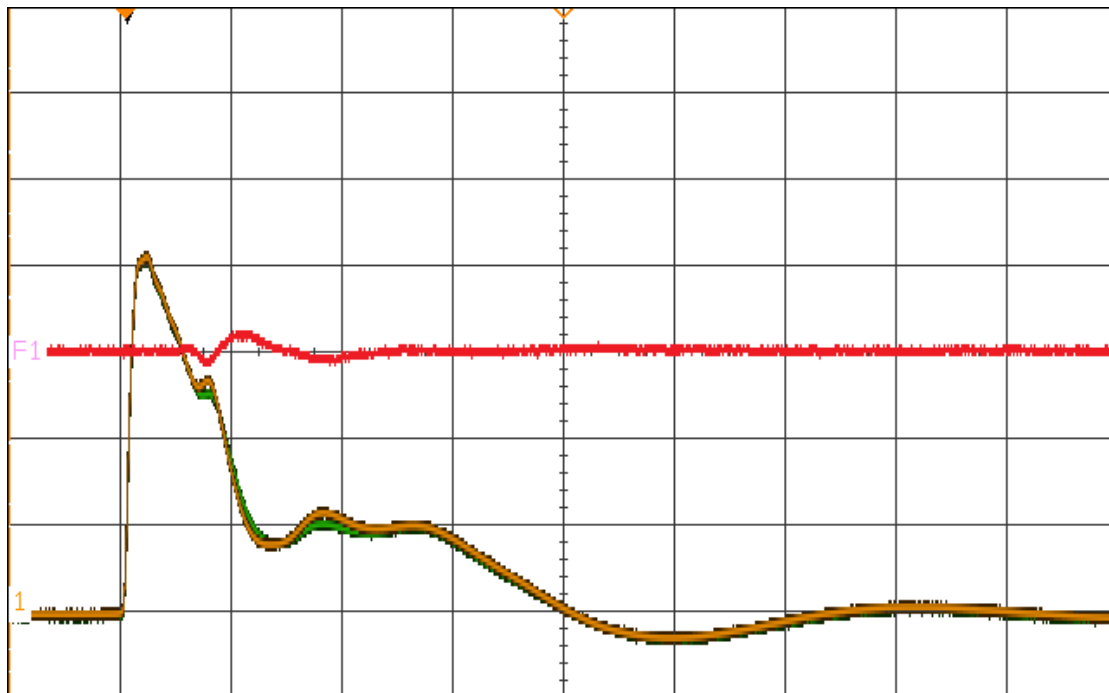


Simulovaný zkrat mezi 10. a 11. závitem

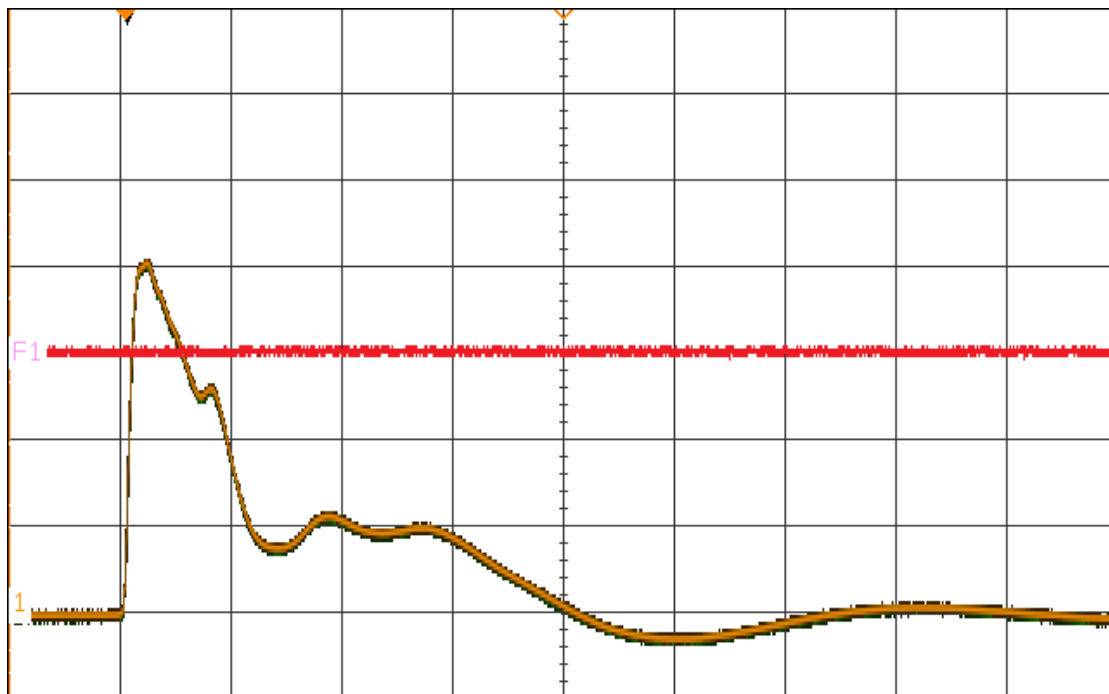


Obr. 21: Simulovaný zkrat mezi 11. a 12. závitem

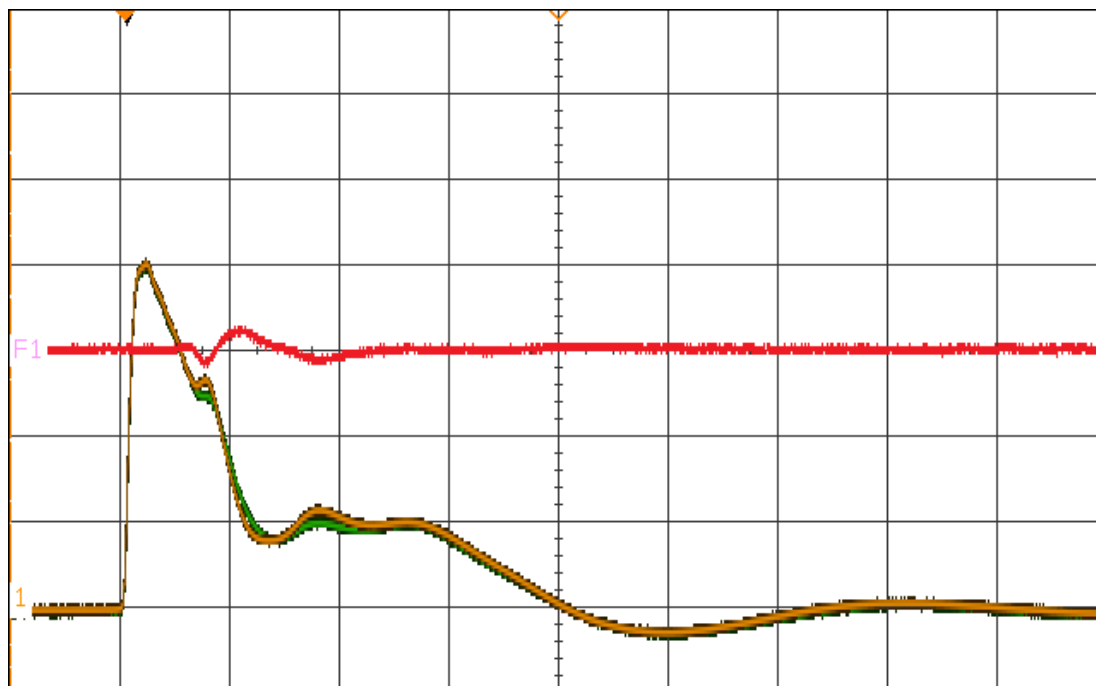
Šestá cívka:



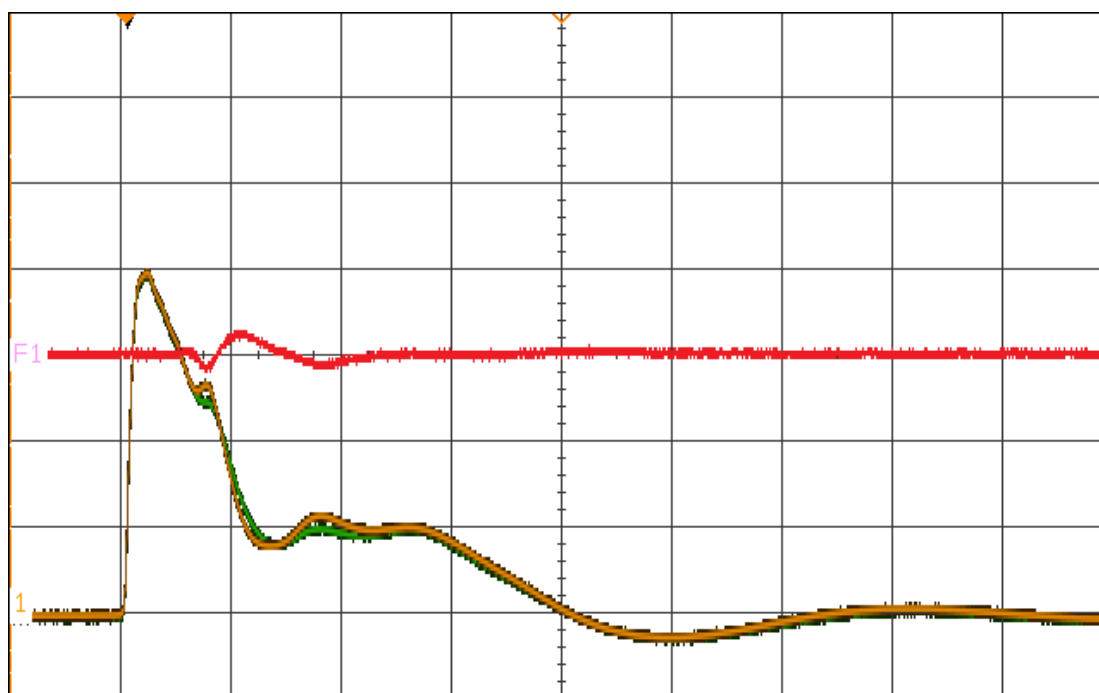
Obr. 22: Simulovaný zkrat mezi 1. a 2. závitem



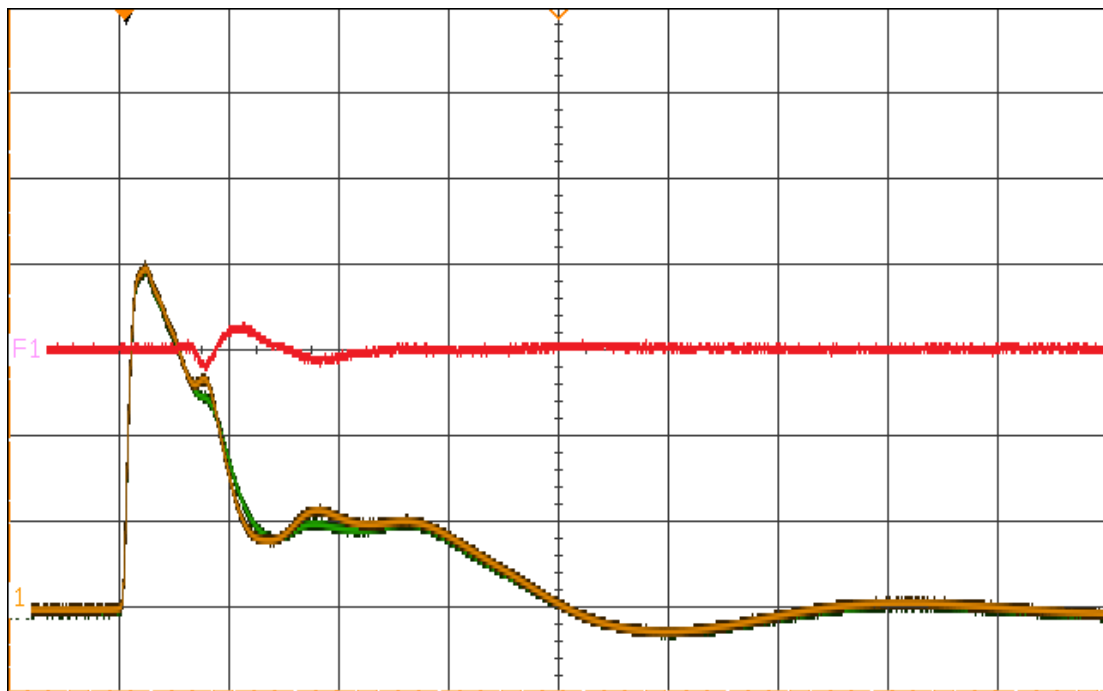
Obr. 23: Simulovaný zkrat mezi 2. a 3. závitem



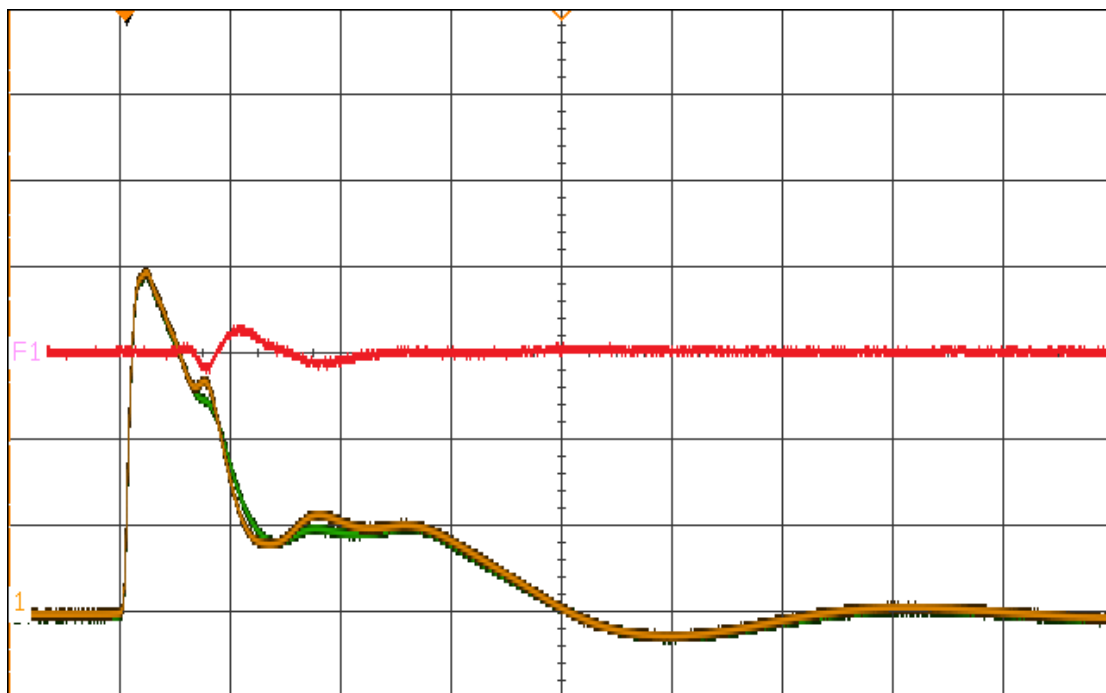
Obr. 24: Simulovaný zkrat mezi 3. a 4. závitem



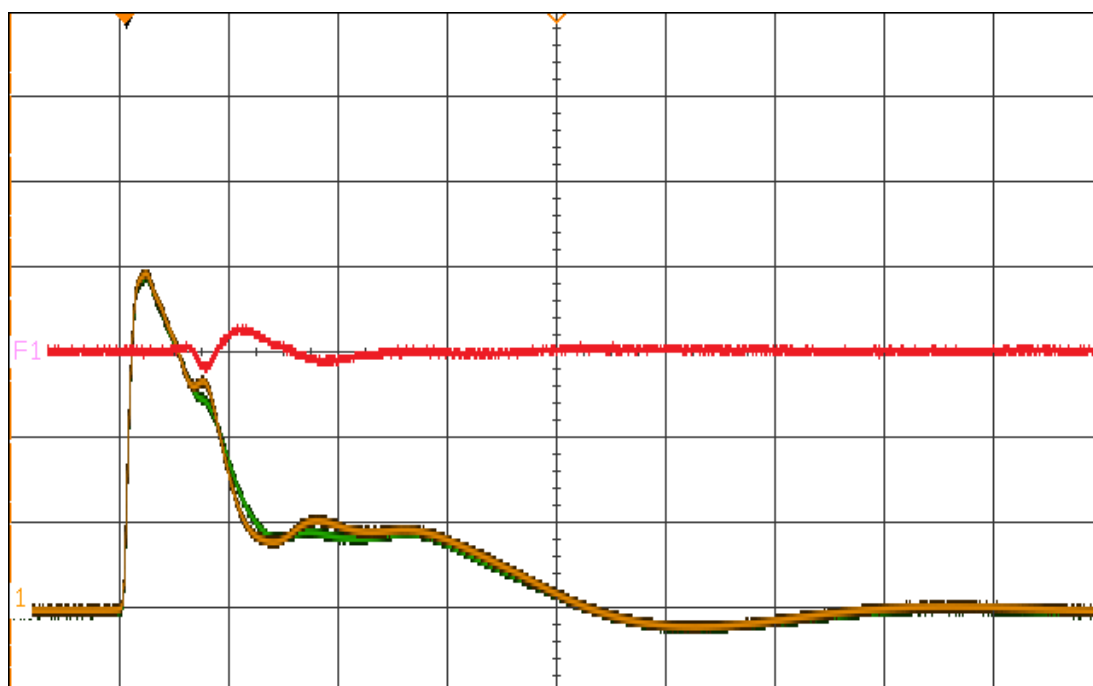
Obr. 25: Simulovaný zkrat mezi 4. a 5. závitem



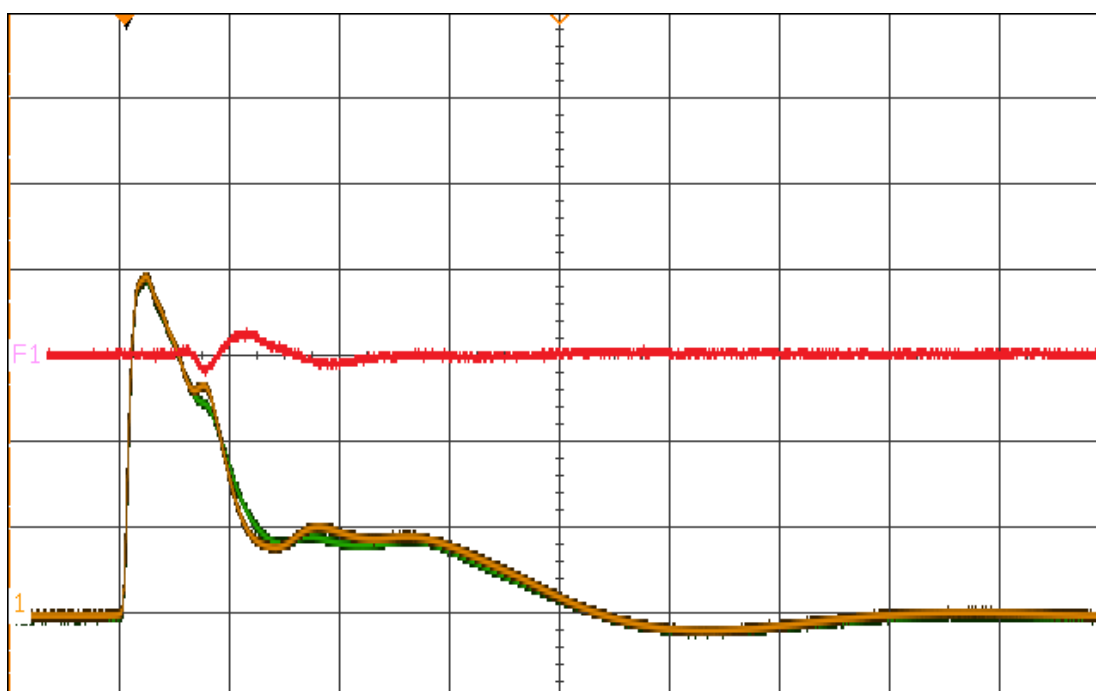
Obr. 26: Simulovaný zkrat mezi 5. a 6. závitem



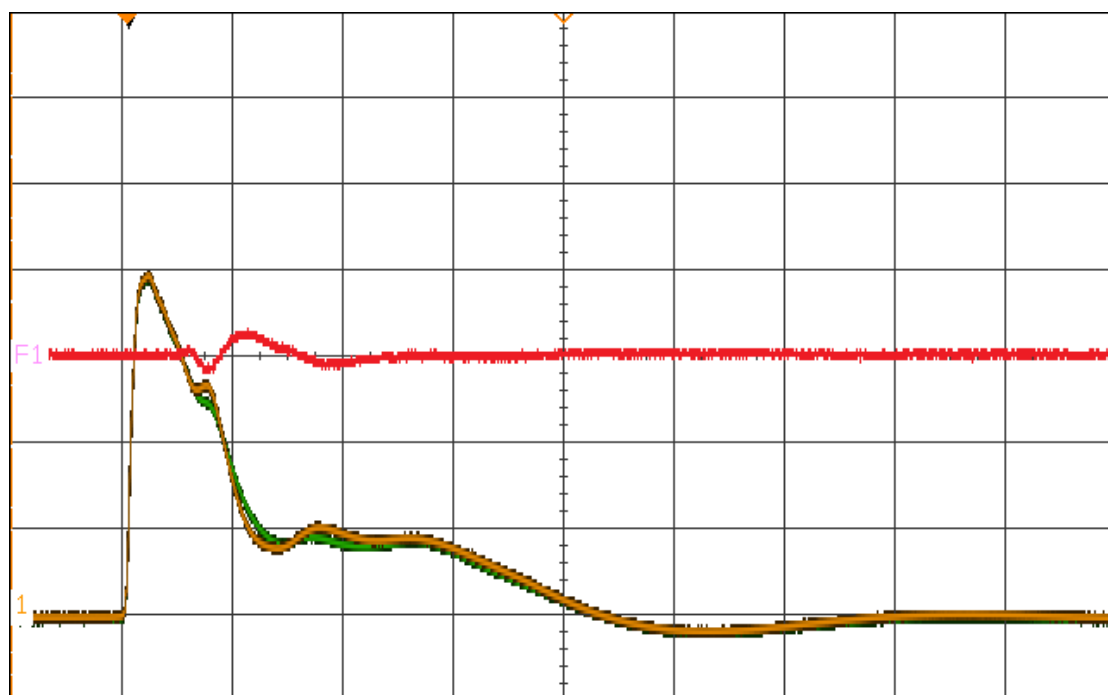
Obr. 27: Simulovaný zkrat mezi 6. a 7. závitem



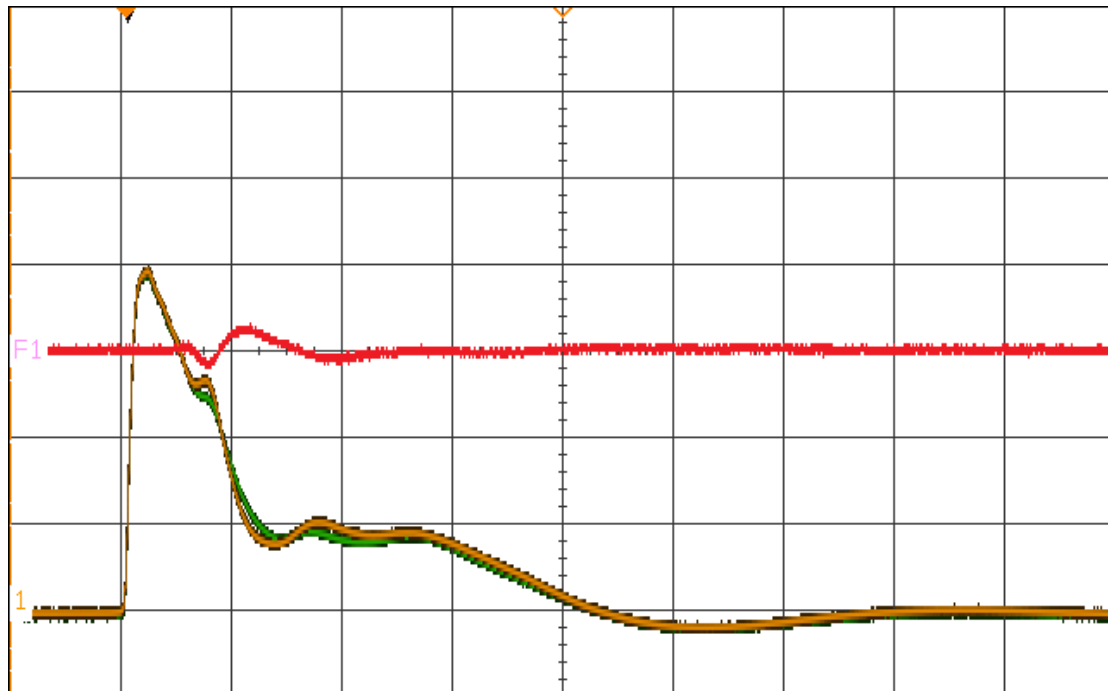
Obr. 28: Simulovaný zkrat mezi 7. a 8. závitem



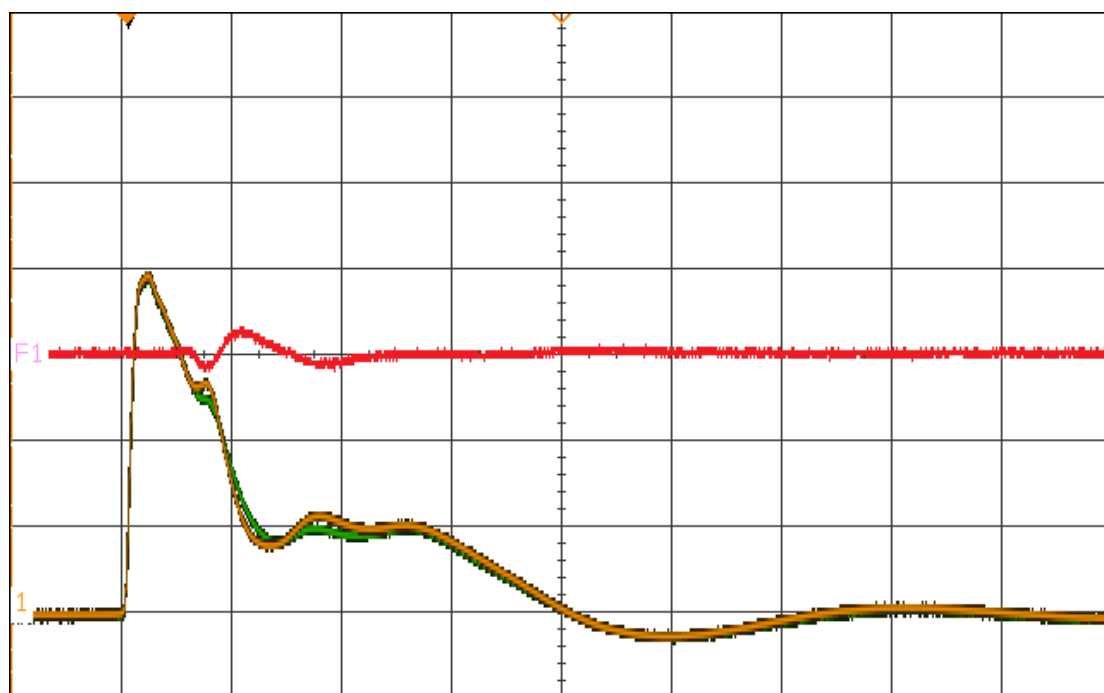
Obr. 29: Simulovaný zkrat mezi 8. a 9. závitem



Obr. 29: Simulovaný zkrat mezi 9. a 10. závitem



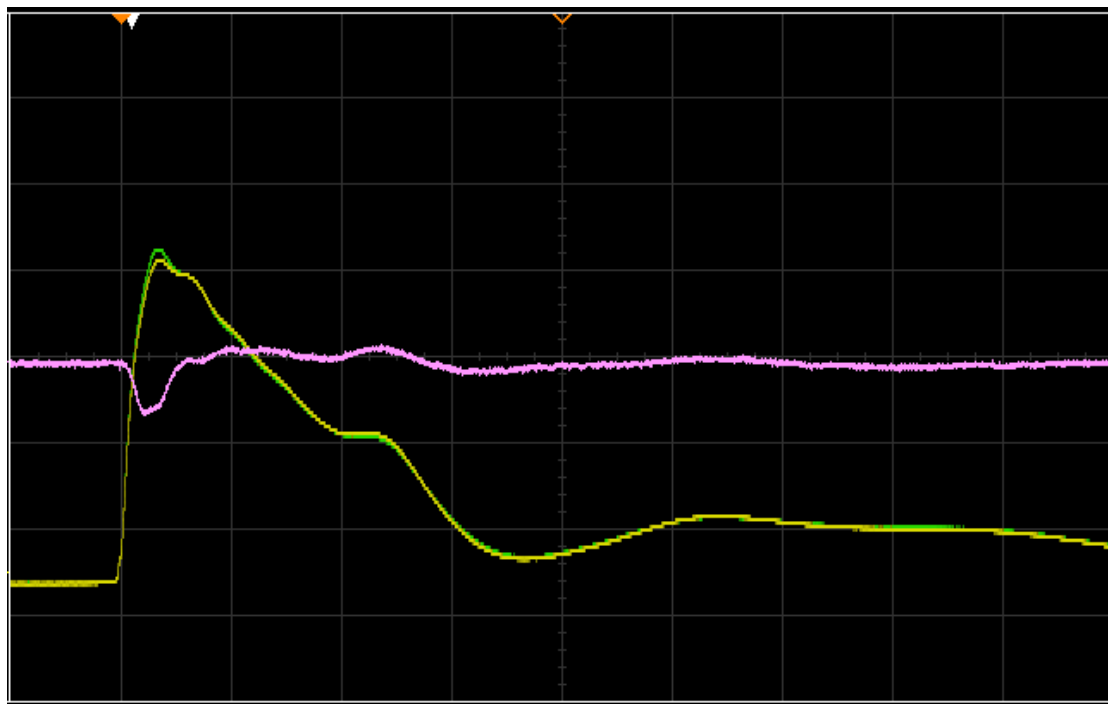
Obr. 30: Simulovaný zkrat mezi 10. a 11. závitem



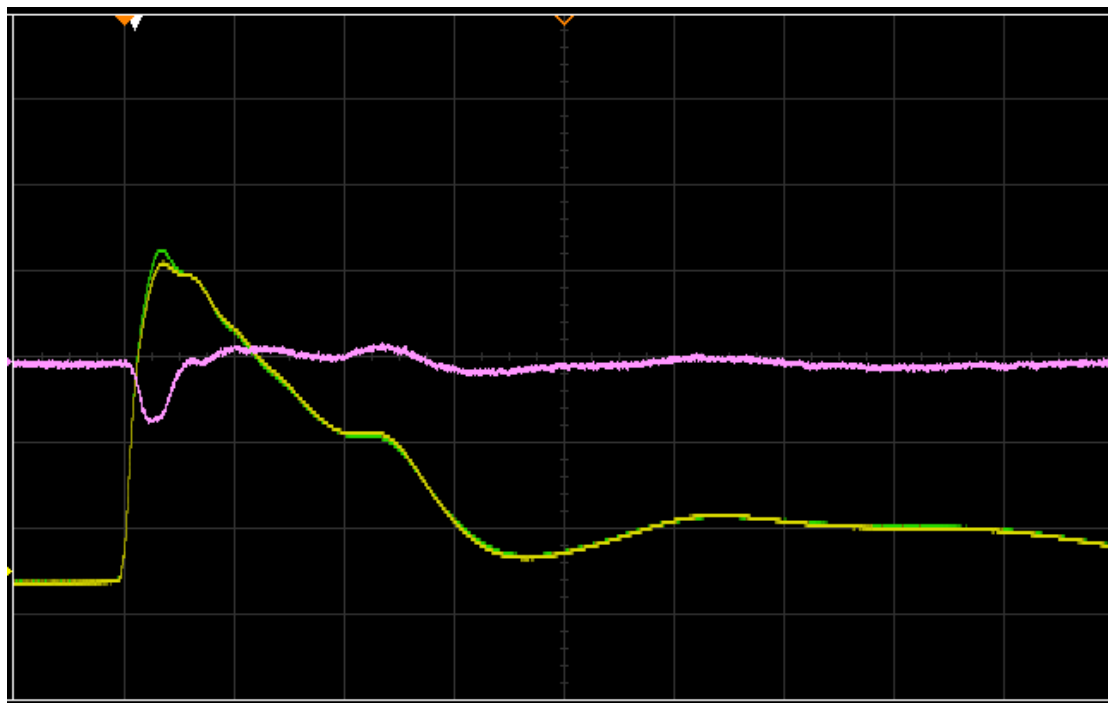
Obr. 31: Simulovaný zkrat mezi 11. a 12. závitem

Měření k určení závitu se zkratem:

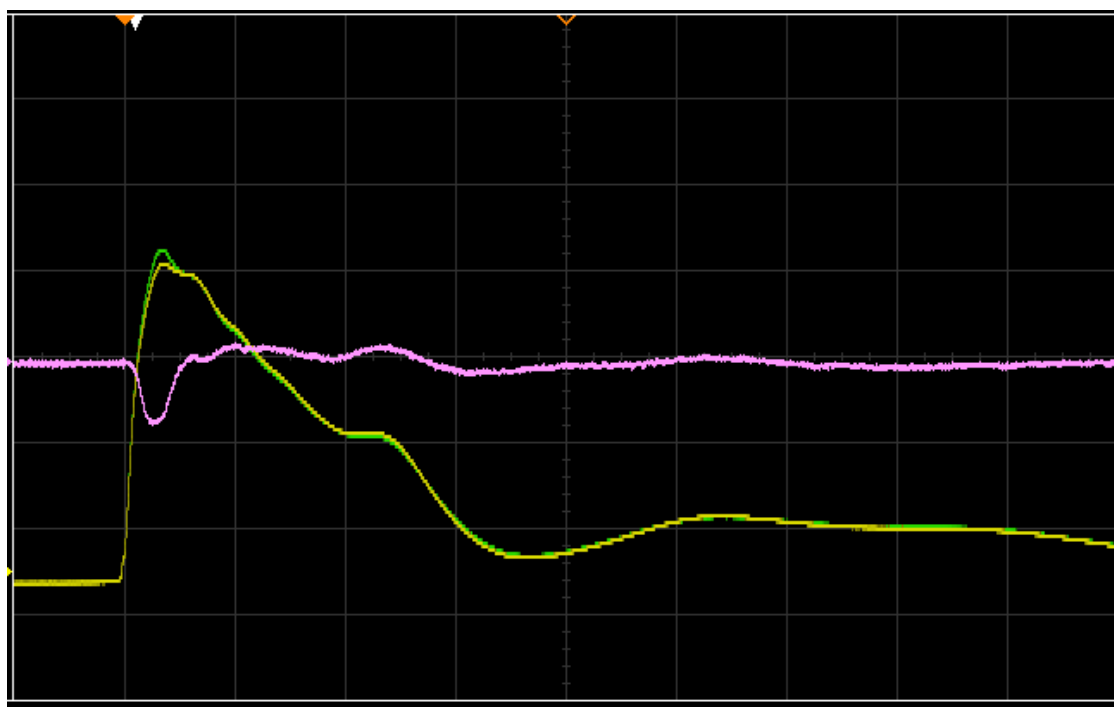
První cívka:



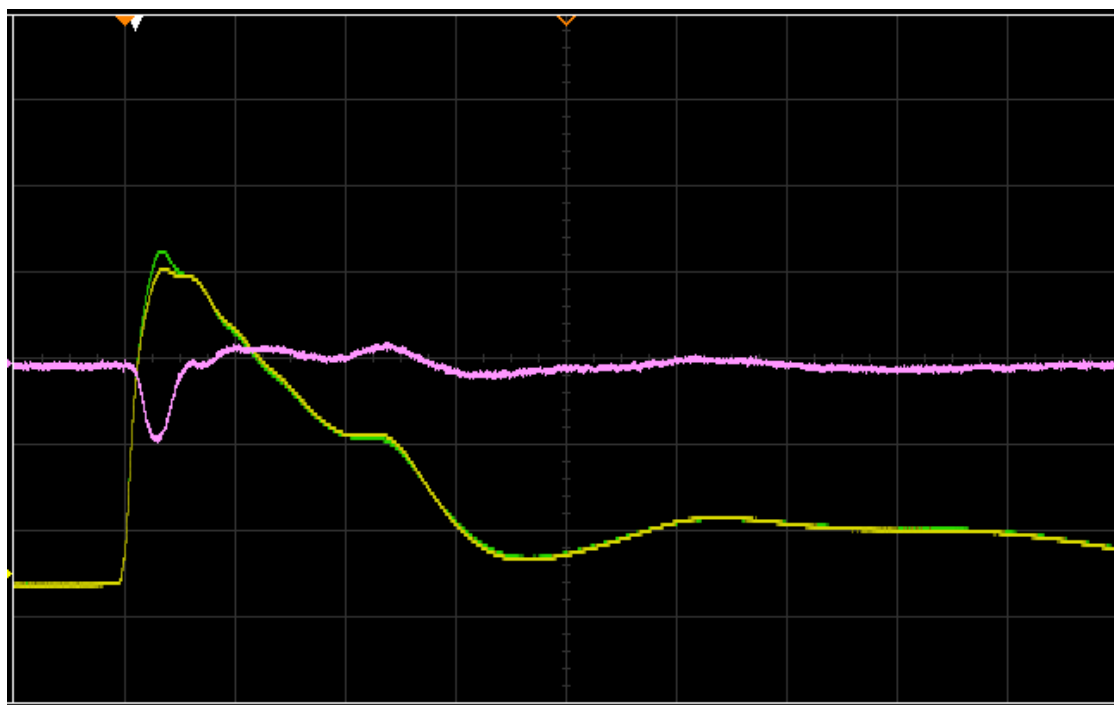
Obr. 32: Simulovaný zkrat mezi 1. a 2. závitem



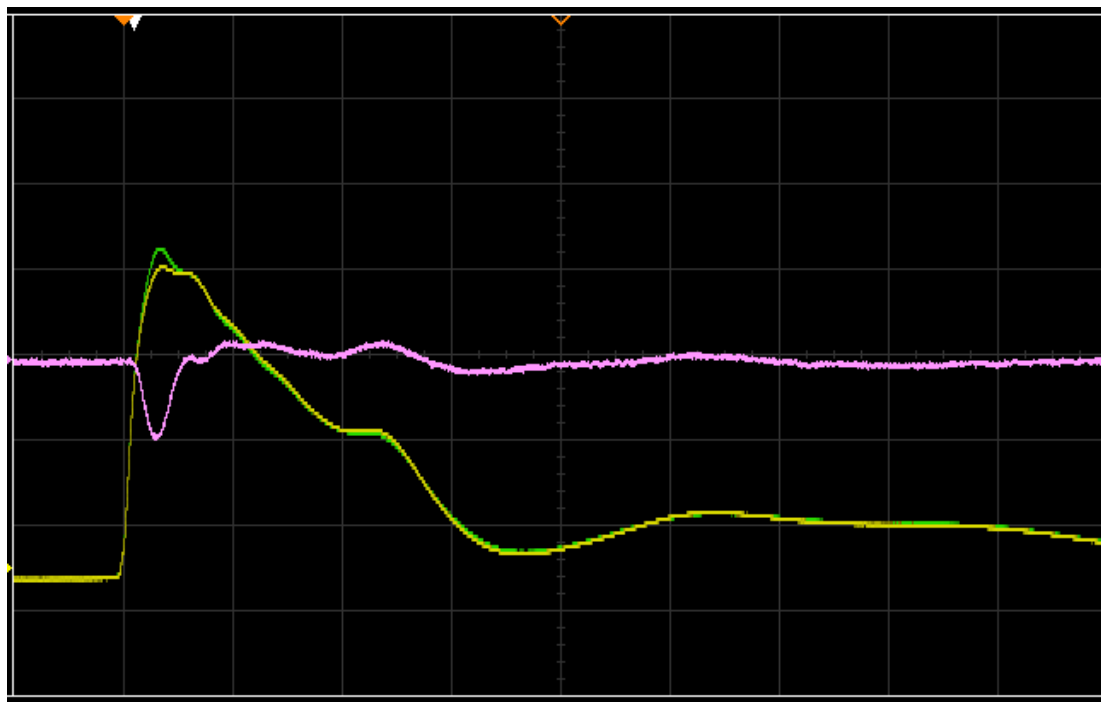
Obr. 33: Simulovaný zkrat mezi 2. a 3. závitem



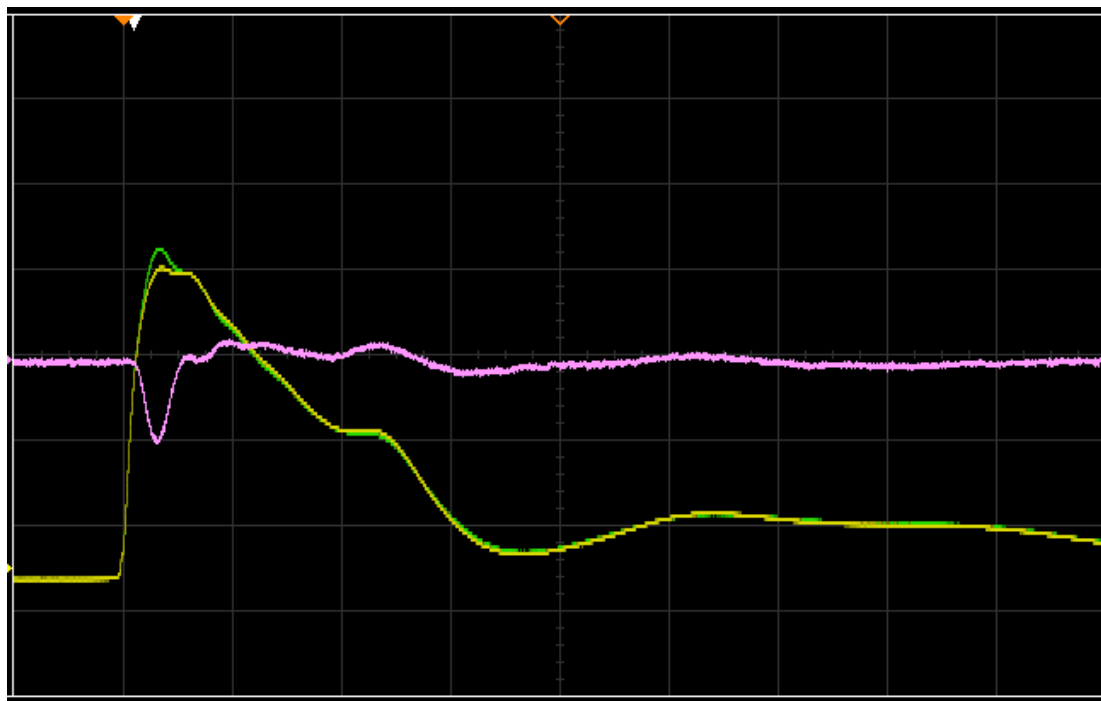
Obr. 34: Simulovaný zkrat mezi 3. a 4. závitem



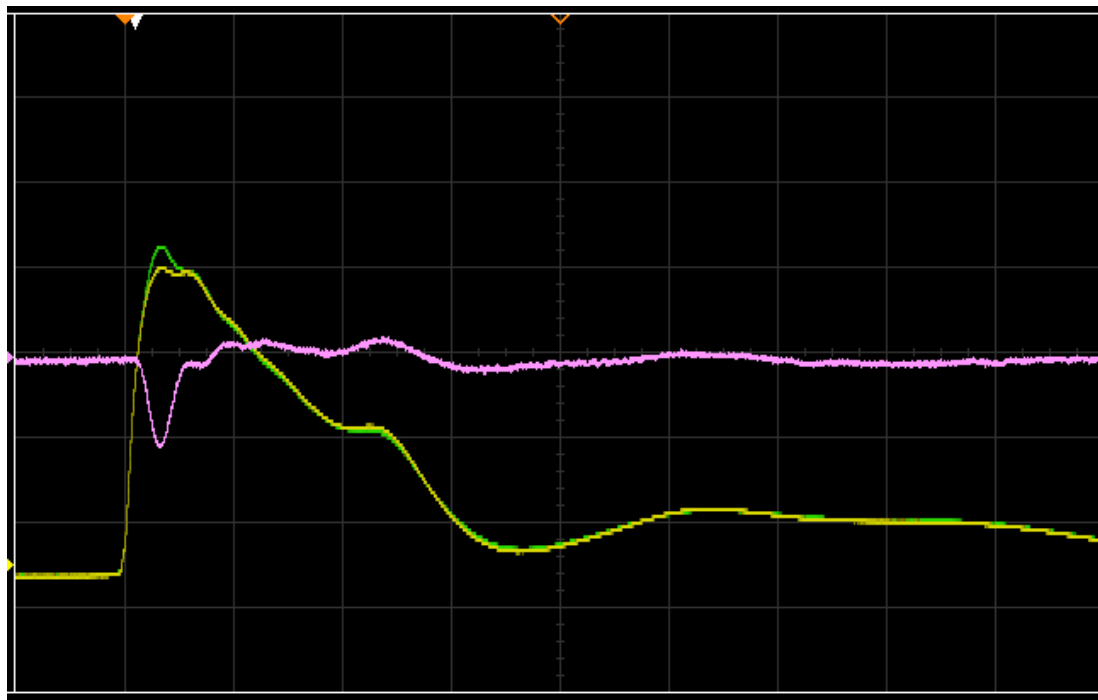
Obr. 35: Simulovaný zkrat mezi 4. a 5. závitem



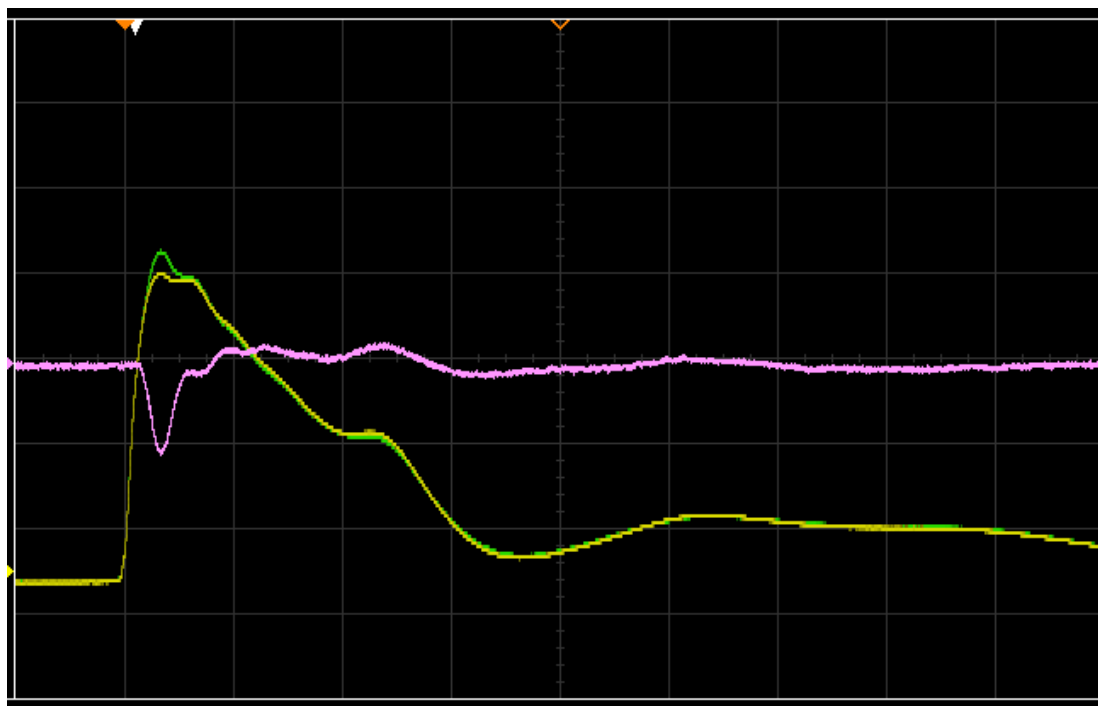
Obr. 36: Simulovaný zkrat mezi 5. a 6. závitem



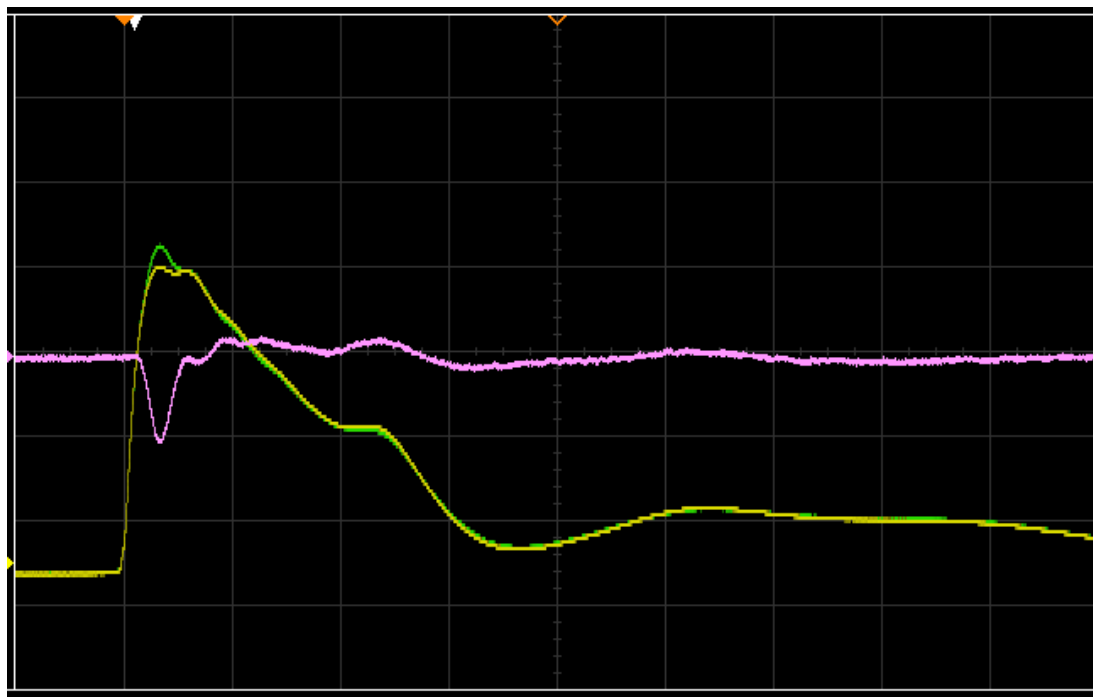
Obr. 37: Simulovaný zkrat mezi 6. a 7. závitem



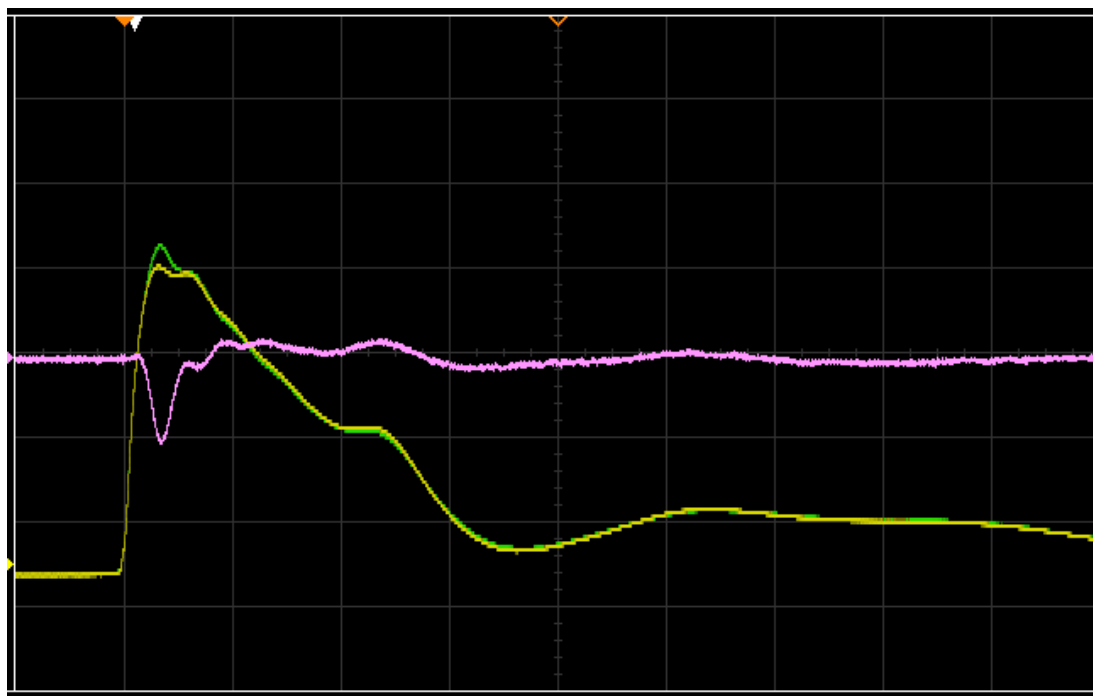
Obr. 38: Simulovaný zkrat mezi 7. a 8. závitem



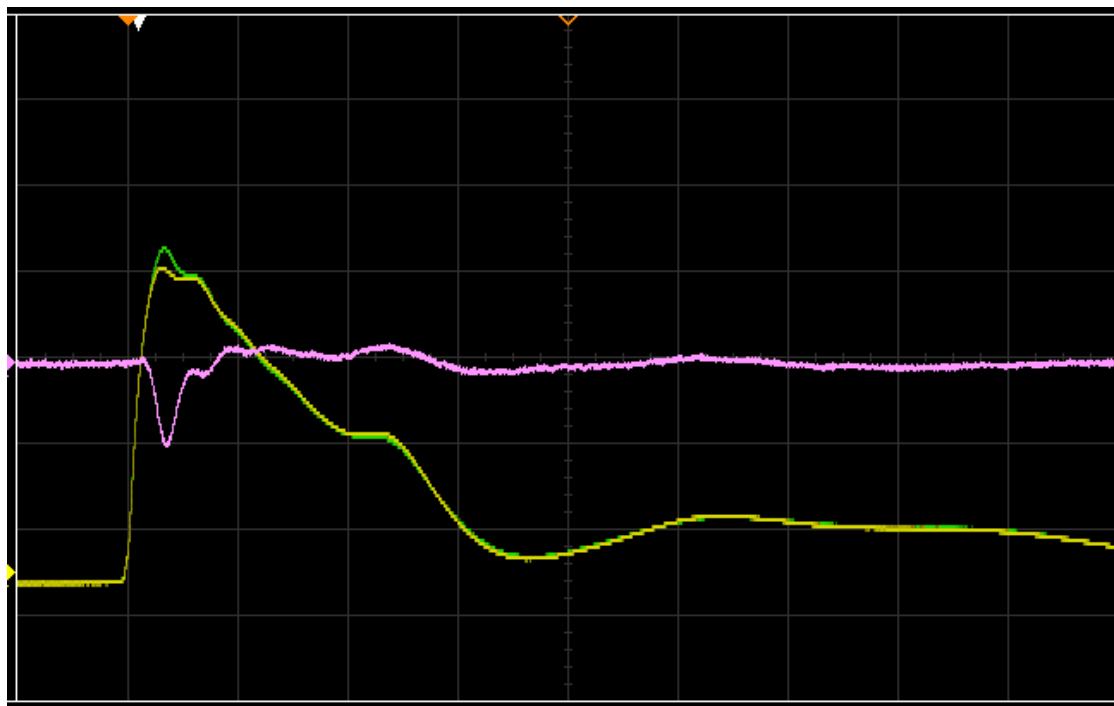
Obr. 39: Simulovaný zkrat mezi 8. a 9. závitem



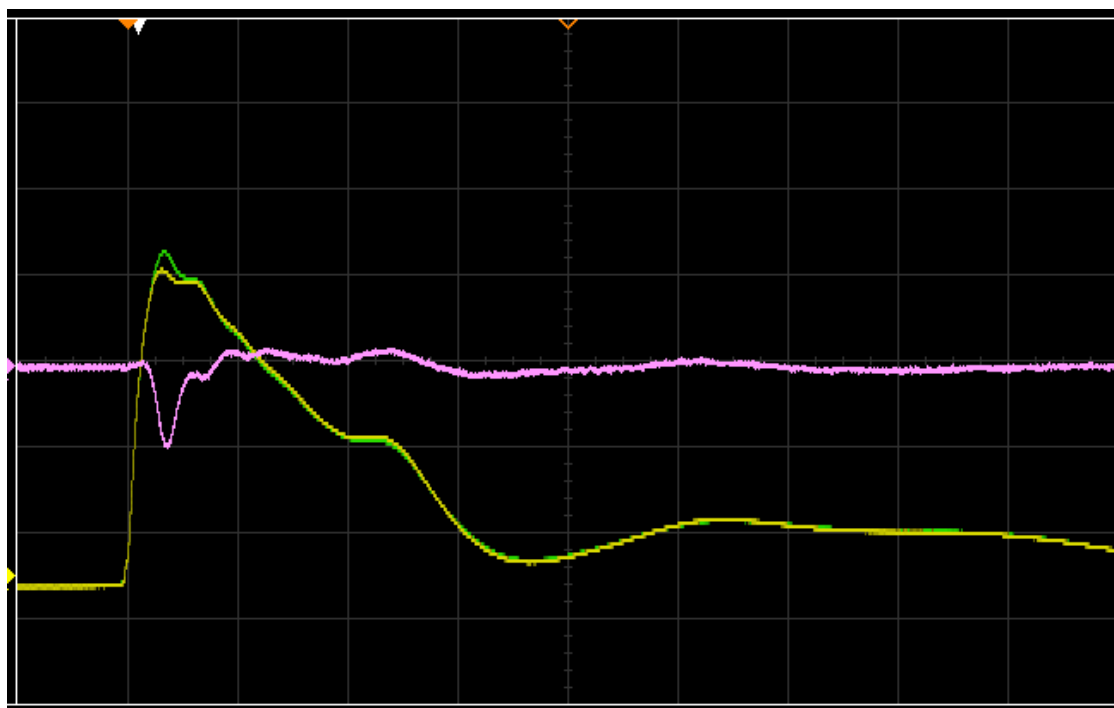
Obr. 40: Simulovaný zkrat mezi 9. a 10. závitem



Obr. 41: Simulovaný zkrat mezi 10. a 11. závitem

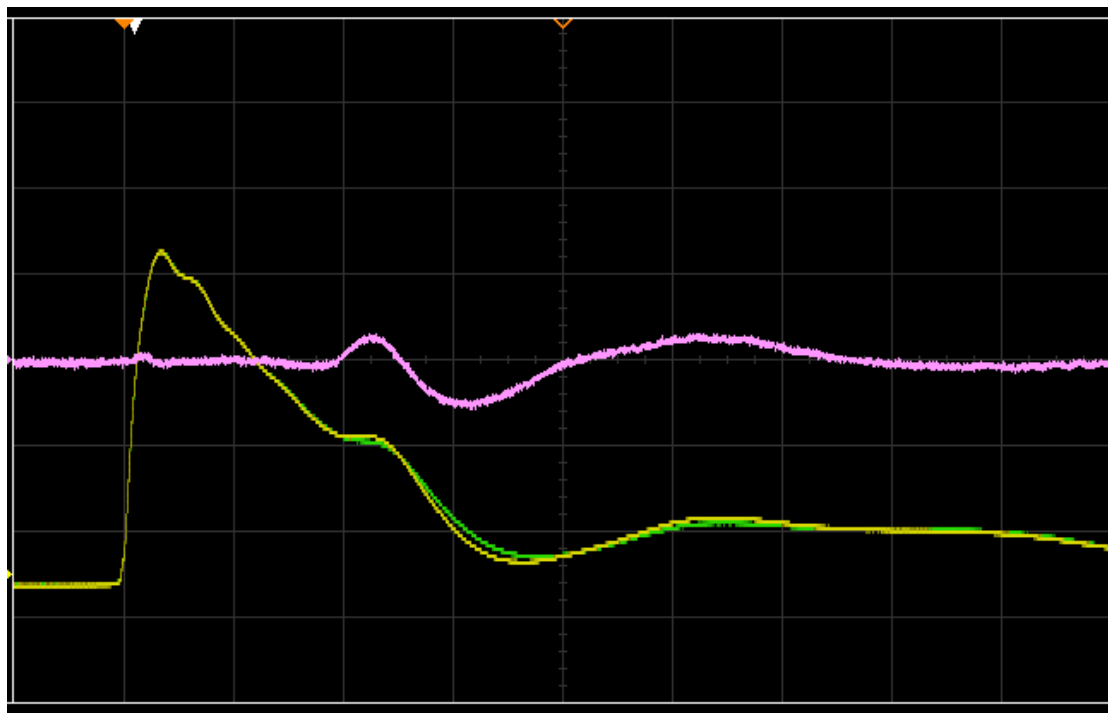


Obr. 42: Simulovaný zkrat mezi 11. a 12. závitem

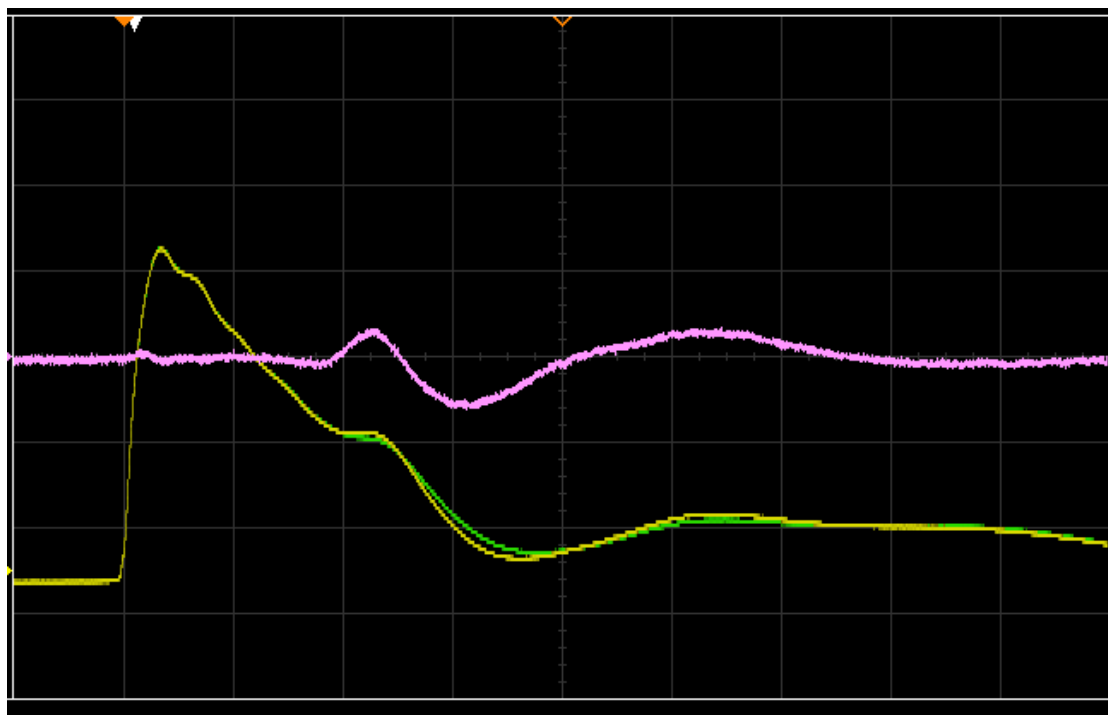


Obr. 43: Simulovaný zkrat mezi 12. a 13. závitem

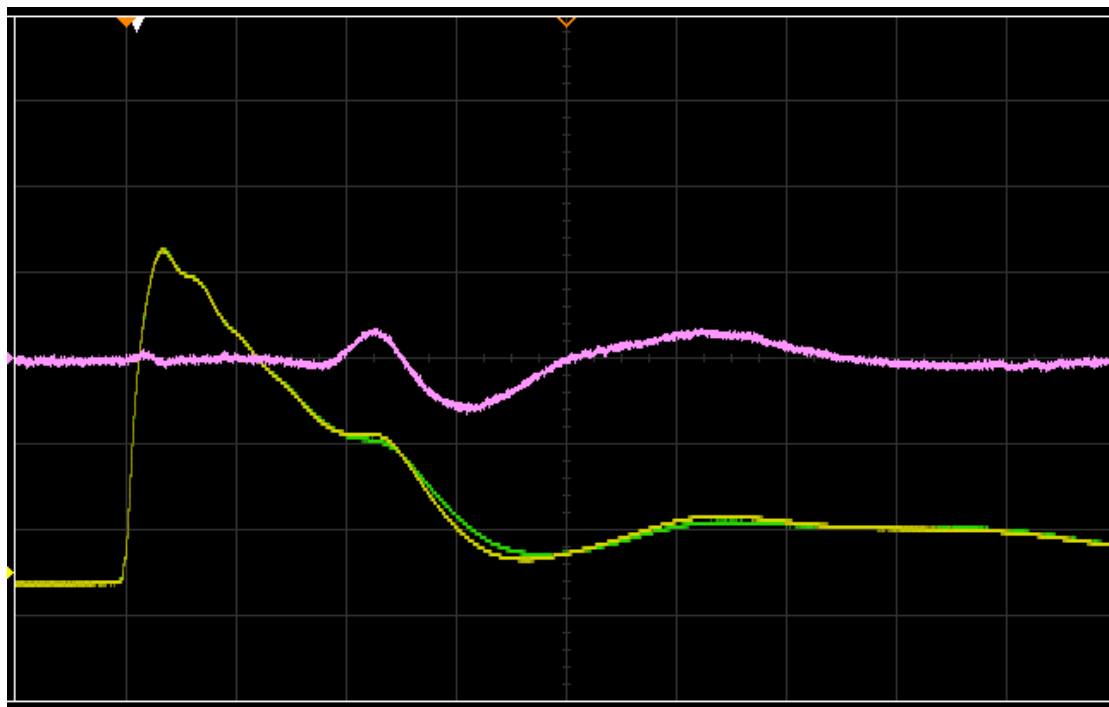
Šestá cívka:



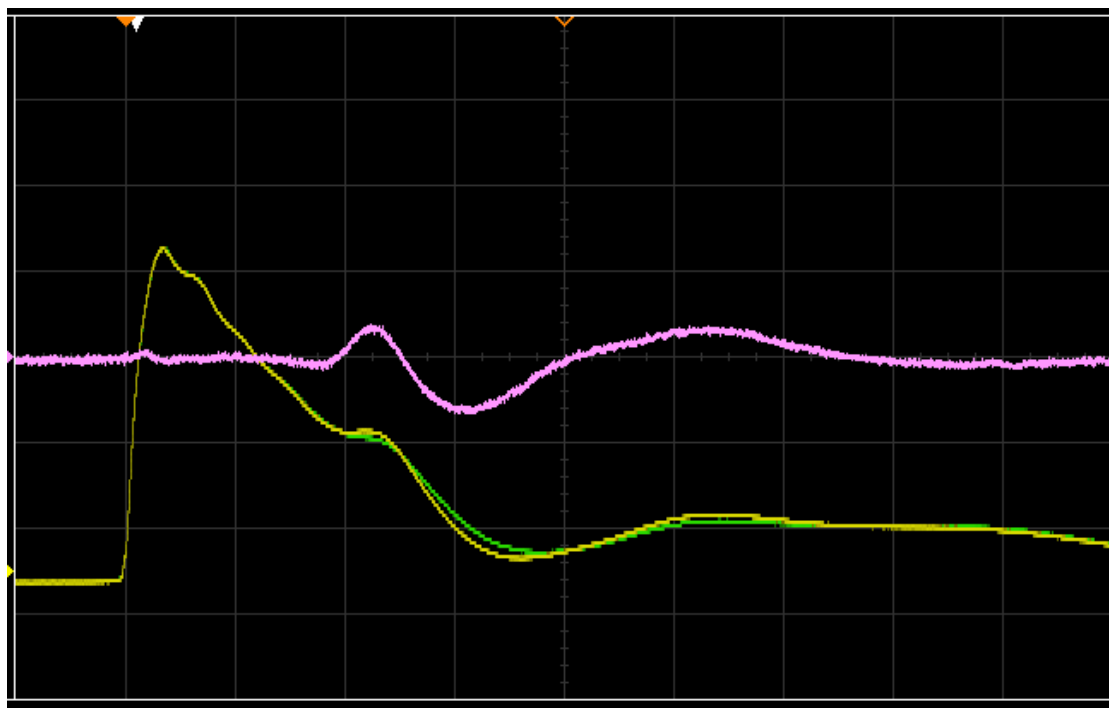
Obr. 44: Simulovaný zkrat mezi 1. a 2. Závitem



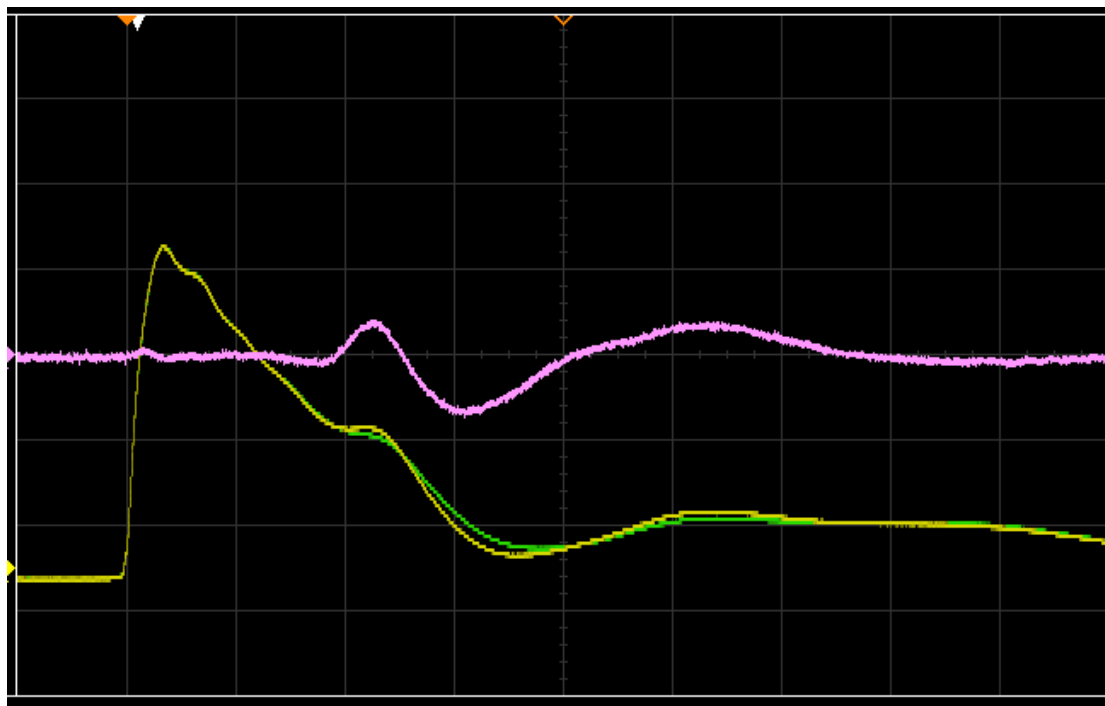
Obr. 45: Simulovaný zkrat mezi 2. a 3. závitem



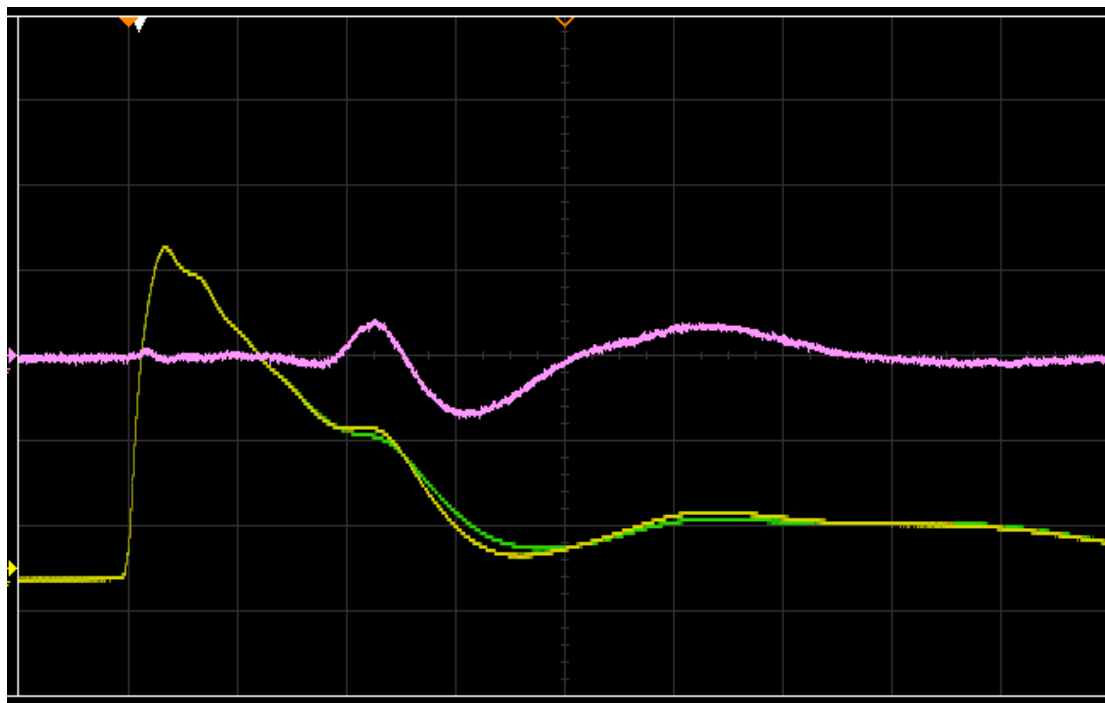
Obr. 46: Simulovaný zkrat mezi 3. a 4. závitem



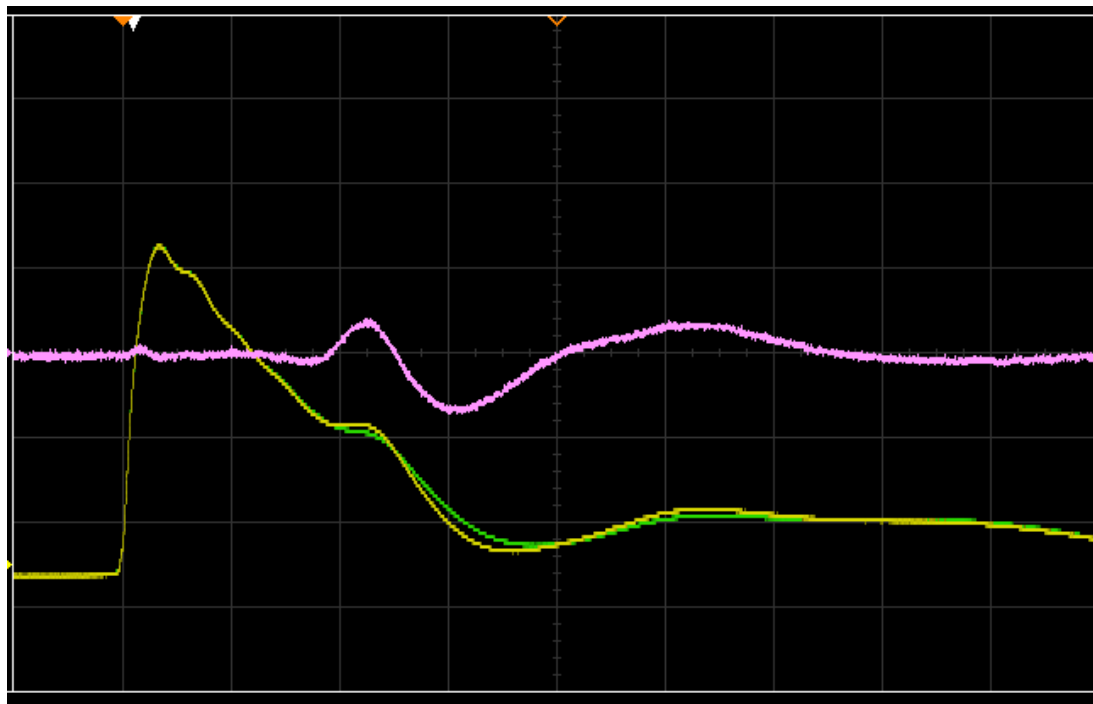
Obr. 47: Simulovaný zkrat mezi 4. a 5. závitem



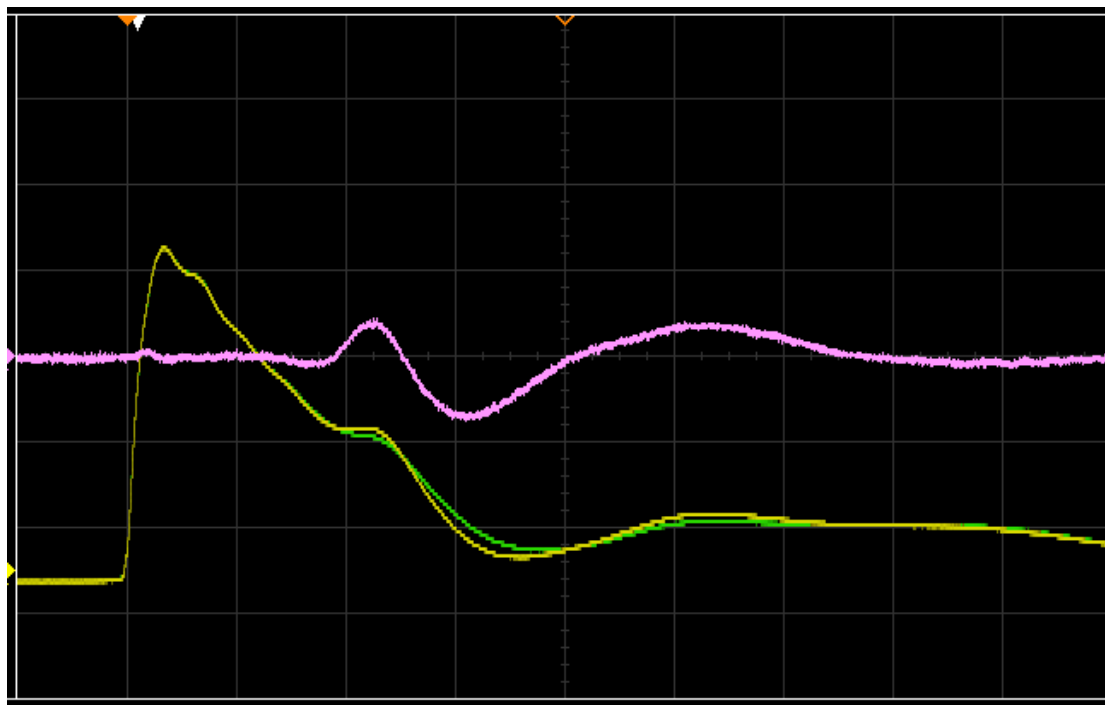
Obr. 48: Simulovaný zkrat mezi 5. a 6. závitem



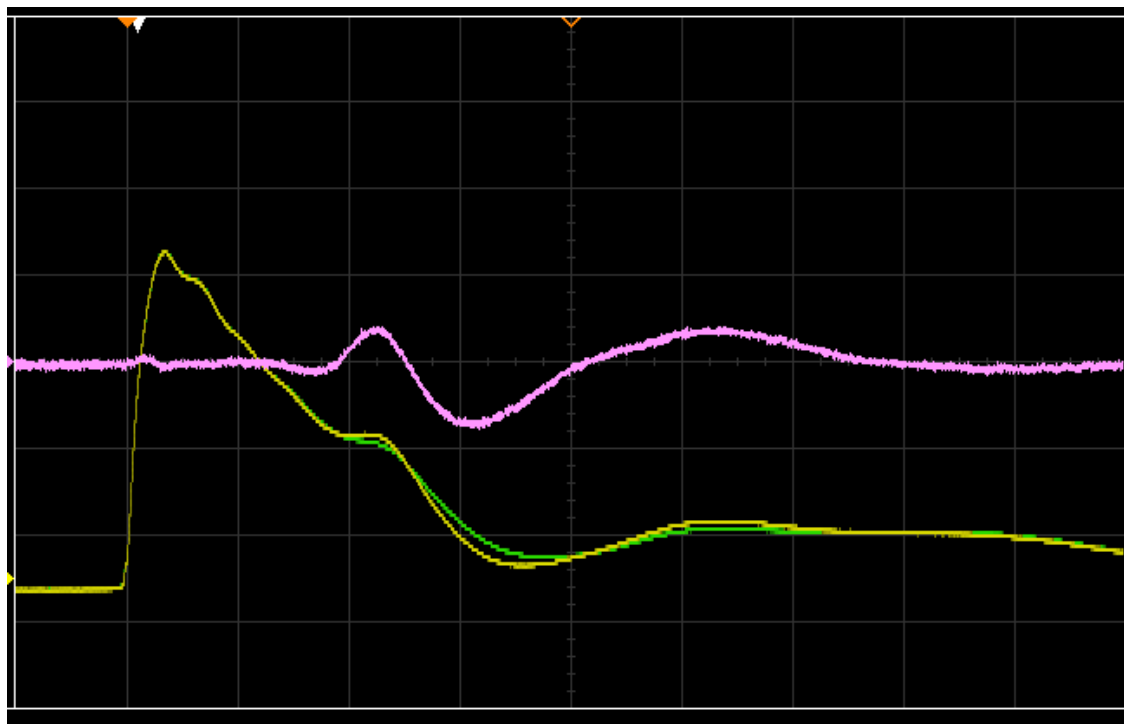
Obr. 49: Simulovaný zkrat mezi 6. a 7. závitem



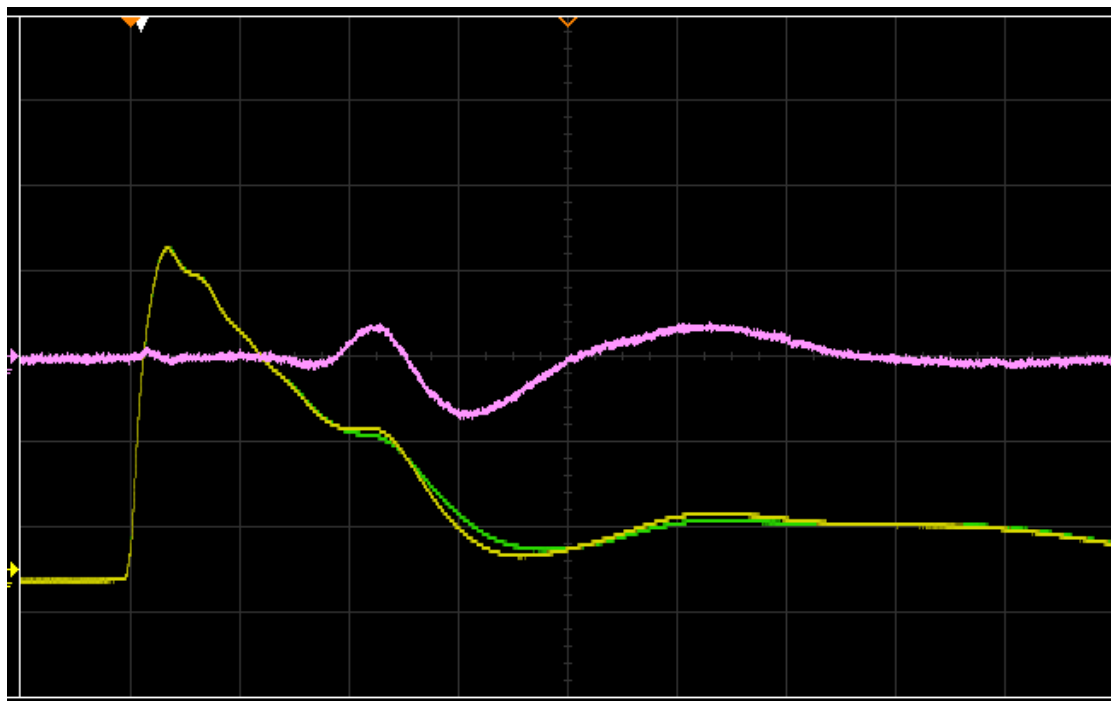
Obr. 50: Simulovaný zkrat mezi 7. a 8. závitem



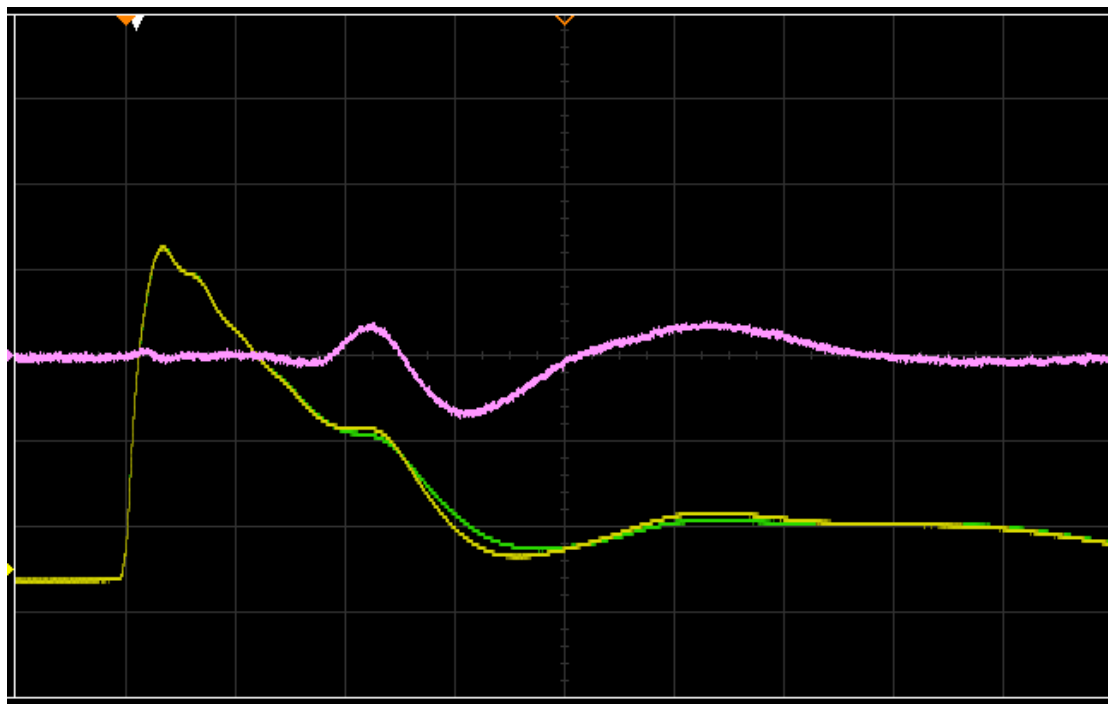
Obr. 51: Simulovaný zkrat mezi 8. a 9. závitem



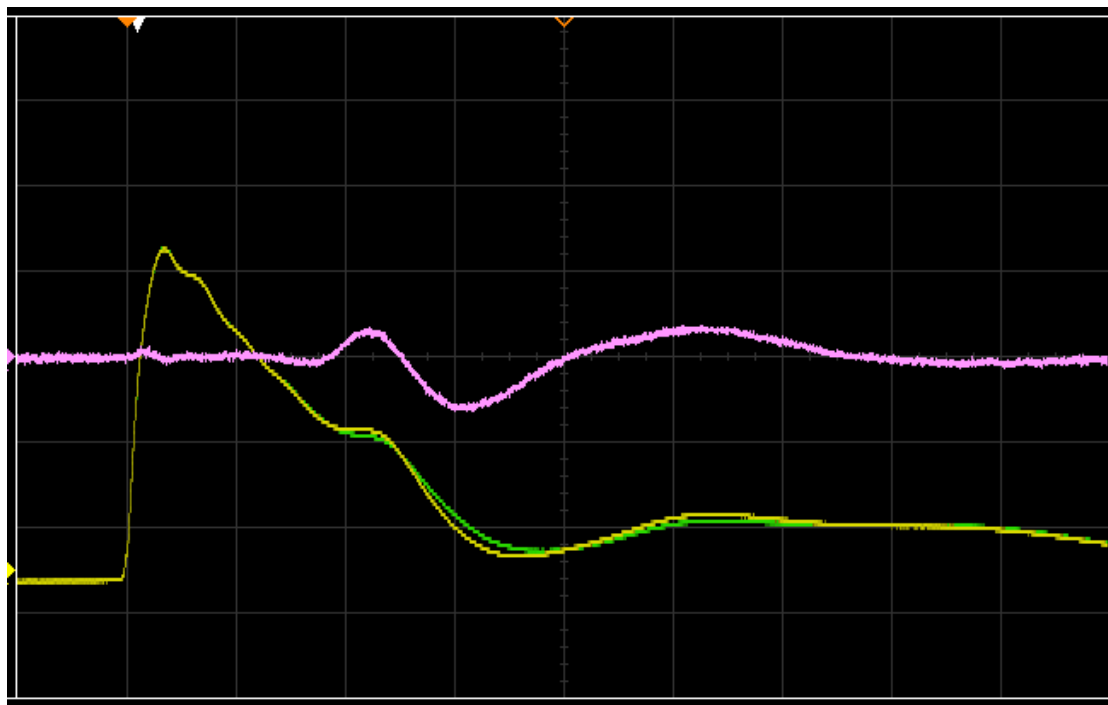
Obr. 52: Simulovaný zkrat mezi 9. a 10. závitem



Obr. 53: Simulovaný zkrat mezi 10. a 11. závitem



Obr. 54: Simulovaný zkrat mezi 11. a 12. závitem



Obr. 55: Simulovaný zkrat mezi 12. a 13. závitem