doc. Ing. Martin NOVÁK, Ph.D.
ČVUT v Praze, Fakulta strojní,
Ústav přístrojové a řídicí techniky

Nejčastější chyby při návrhu rozvaděčů a experimentálních zařízení z hlediska elektromagnetické kompatibility a jejich prevence

The Most Common Errors in Design of Switchboards and Experimental Devices in Terms of Electromagnetic Compatibility and their Prevention

Recenzent
Ing. Pavel Mlejnek, Ph.D.

Problematika elektromagnetické kompatibility je velice důležitá nejen při návrhu experimentálních zařízení. Cílem tohoto článku je ukázat na nejčastější chyby při návrhu rozvaděčů a dalších technologií z hlediska vzájemného rušení, a zejména ukázat na možnosti prevence problémů, které rušení může způsobovat při nevhodném návrhu rozvaděče a dalších částí.
Klíčová slova: *EMC, frekvenční měnič, motor, rozvaděč*

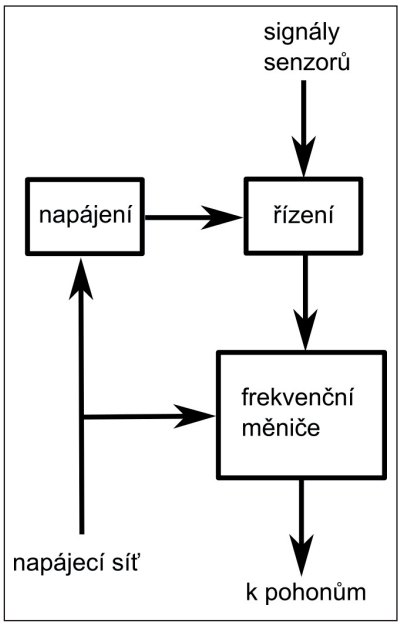
The issue of electromagnetic compatibility is very important not only when designing experimental devices. The aim of this article is to show the most common mistakes in the design of switchboards and other technologies in terms of interference, and in particular to show the possibility of preventing the problems that interference may cause in the inappropriate design of switchboard and other components.
Keywords: *EMC, frequency converter, motor, switchboard*

ÚVOD

V praxi se lze setkat s celou řadou nejen experimentálních zařízení, které vykazují problémy s elektromagnetickým rušením (dále EMC – Electromagnetic Compatibility). Zcela běžná je situace, kdy vybavení a umístění jednotlivých komponent v rozvaděči např. k vytápění, klimatizaci apod. specifikuje osoba, která nemá žádné zkušenosti s EMC. V nejhorším případě stejná osoba pak rozvaděč zapojí. Výsledkem je v mnoha případech zcela nebo částečně nefunkční zařízení. Jednotlivé systémy se navzájem ruší, snímače teploty neměří vůbec nebo se hodnoty náhodně mění, po zapnutí motoru se měřené hodnoty skokově změní, aniž by k tomu byl fyzikálně důvod apod.

Tento článek si klade za cíl ukázat nejčastější problémy při návrhu zmíněných zařízení a doporučit opatření, která povedou ke zmenšení/odstranění problémů s EMC.

Typická struktura rozvaděče je znázorněna na obr. 1. Běžný rozvaděč se dnes skládá ze tří hlavních bloků. Blok řízení sbírá signály ze senzorů, kterými mohou být např. senzory teploty, vlhkosti, tlaku, průtoku apod. Řízení je většinou realizováno v průmyslových systémech programovatelným automatem (PLC), v jednodušších aplikacích např. programovatelným relé.



Obr. 1 Typická struktura rozvaděče
Fig. 1 Typical switchboard arrangement

Naopak v experimentálních a rozsáhlých systémech se může jednat o průmyslový počítač s operačním systémem reálného času vybavený požadovanými vstupními a výstupními moduly. Řídicí systém podle požadované funkce zařízení vstupní signály zpracovává a ovládá akční členy, např. čerpadla, ventilátory, klapky.

Další blok sloužící pro ovládání pohonů je nejčastěji frekvenční měnič. Pochopitelně jenom u pohonů, které vyžadují regulaci otáček a momentu (např. regulace průtoku vzduchu regulací otáček ventilátoru). U pohonů, které pracují v režimu zapnuto/vypnuto je finančně mnohem výhodnější používat stykače nebo relé. Zejména frekvenční měniče a jimi řízené pohony jsou zdrojem podstatného rušení a mohou způsobovat výrazné problémy.

Třetím blokem je napájení řídicího systému, převodníků signálů, komunikačních linek, záznamu dat apod. Dnes se používají zejména spínané napájecí zdroje z důvodů menší velikosti a větší účinnosti. Princip spínaného zdroje je velice podobný frekvenčnímu měniči, a tedy napájecí zdroje při nesprávném použití také způsobují problémy s rušením signálů senzorů.

VSTUPY ŘÍDICÍHO SYSTÉMU

Termočlánkové vstupy

Pro měření vyšších teplot se běžně používají termočlánky. Například termočlánky typu J jsou použitelné do přibližně 750 °C, termočlánky typu K do 1250 °C. Maximální teplota závisí na provedení termočlánku, průřezu termočlánkového drátu, izolaci atd. Výhodou termočlánku je schopnost měřit vysoké teploty a nízká cena. Nevýhodou je potřeba kompenzace/měření teploty studeného konce a z hlediska EMC velice malý výstupní signál.

Termočlánek měří rozdíl teplot mezi měřicím a srovnávacím koncem. Výstupem je termoelektrické napětí závislé na rozdílu teplot. Ať už se jedná o jakýkoliv typ termočlánku, výstupní napětí je velice malé,

v řádu desítek, případně stovek μV, při větším teplotním rozdílu maximálně v řádech mV. Například termočlánek typu J má citlivost přibližně 55 μV/°C. Při měřeném teplotním rozdílu např. 50 °C bude výstupní napětí 2,75 mV. Pro ostatní typy termočlánků je výstupní napětí obdobné.

Z hlediska EMC je to obrovská nevýhoda. Signál z termočlánku lze velice snadno rušit. Na obr. 2 až obr. 4 je ukázáno naměřené termočlánkové napětí v nevhodně provedeném rozvaděči. Všechny průběhy mají stejná měřítka v obou osách (20 mV/dílek).

Obr. 2 ukazuje naměřené napětí přímo na termočlánkovém vstupu. Teplotní rozdíl byl malý a tomu odpovídá i malé měřené napětí – cca 1 mV. V obrázku není patrné žádné výrazné rušení.

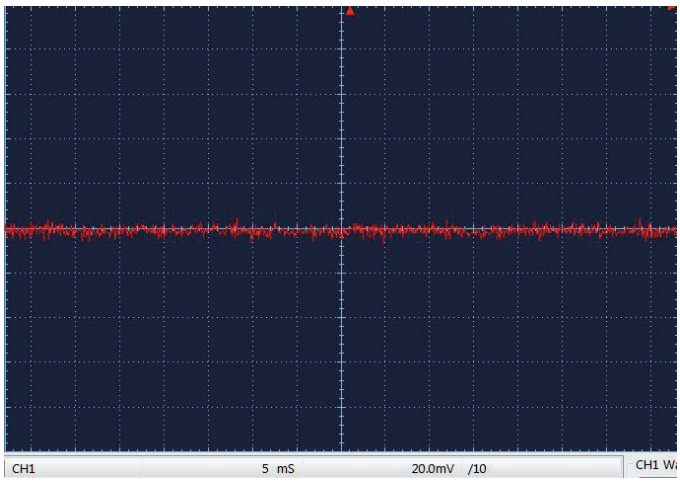
Obr. 3 ukazuje tentýž signál na termočlánkovém vstupu po zapnutí napájení PLC, resp. celého rozvaděče. Z důvodů nevhodného souběhu napájecích kabelů s termočlánkovým vedením je patrné velice výrazné rušení od sítě s frekvencí 50 Hz.

Obr. 4 ukazuje opět stejný signál při zapnutém napájení rozvaděče a aktivní jednotce AFE (Active Front End). Jednotka AFE je principiálně frekvenční měnič, který umožnuje zpětně získávat energii do sítě. Rušivý signál má řádově 100x větší amplitudu než užitečný signál.

Vstupy Pt100

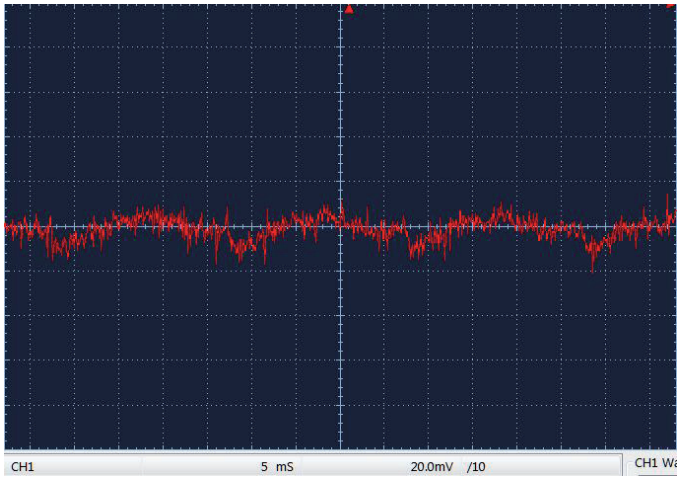
Pro přesnější měření teplot se používají odporové snímače teploty Pt100. Jsou výrazně přesnější (až 0,1 % z rozsahu) než termočlánky, ale jsou také výrazně dražší. Ve srovnání s termočlánky mají také menší teplotní rozsah, typicky do 600 °C.

Odporové snímače teploty pracují na principu změny elektrického odporu se změnou teploty. Prakticky se však měří napětí nebo proud v obvodu. Signál je tedy opět citlivý na rušení.



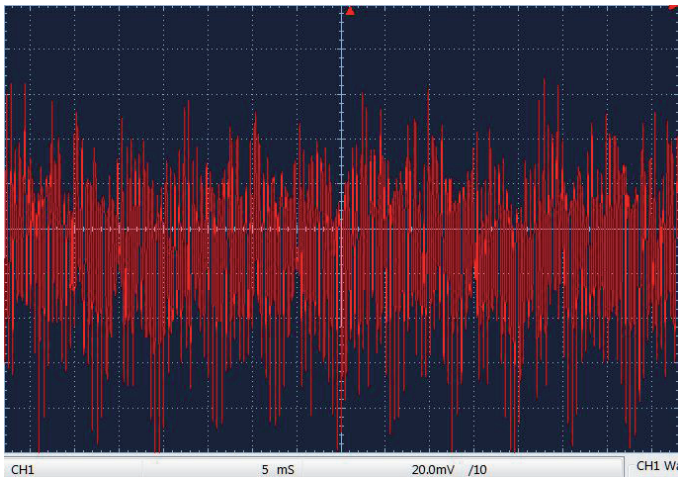
Obr. 2 Termočlánkový vstup, vypnuté napájení 50 Hz a vypnutá AFE

Fig. 2 Thermocouple input, power 50 Hz switched off and AFE switched off



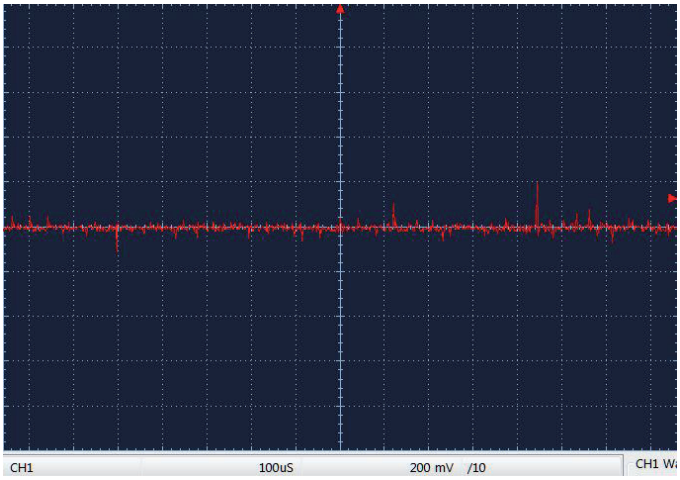
Obr. 3 Termočlánkový vstup, zapnuté napájení 50 Hz a vypnutá AFE

Fig. 3 Thermocouple input, power 50 Hz switched on and AFE switched off



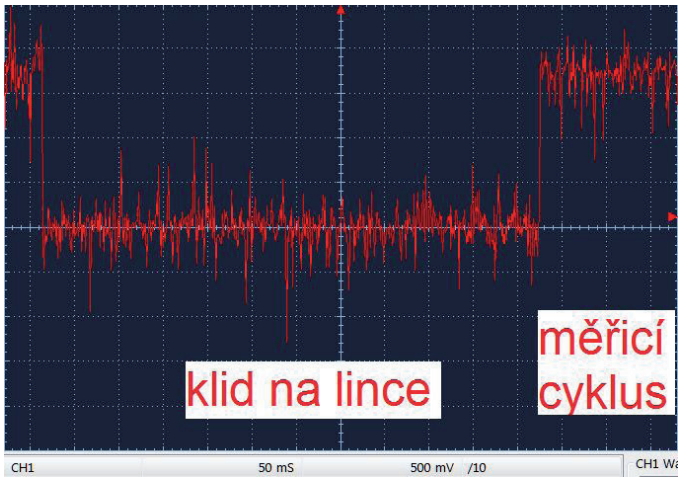
Obr. 4 Termočlánkový vstup, zapnuté napájení 50 Hz a zapnutá AFE

Fig. 4 Thermocouple input, power 50 Hz switched on and AFE switched on



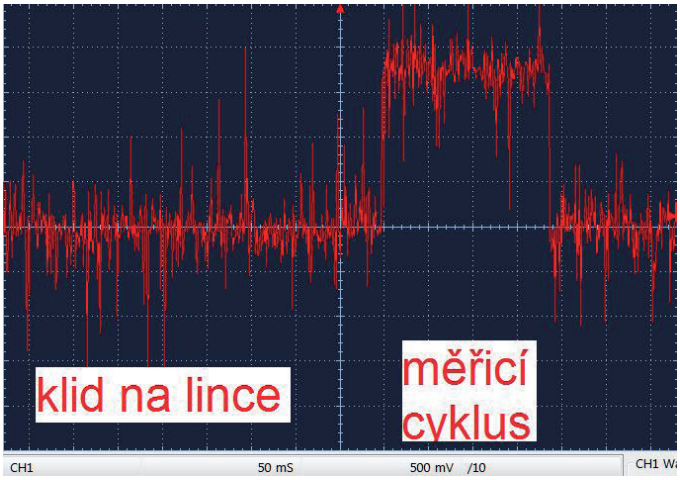
Obr. 5 Pt100 vstup, vypnuté napájení 50 Hz a vypnutá AFE

Fig. 5 Pt100 input, power 50 Hz switched off and AFE switched off



Obr. 6 Pt100 vstup, zapnuté napájení 50 Hz a vypnutá AFE

Fig. 6 Pt100 input, power 50 Hz switched on and AFE switched off



Obr. 7 Pt100 vstup, zapnuté napájení 50 Hz a zapnutá AFE

Fig. 7 Pt100 input, power 50 Hz switched on and AFE switched on

Na obr. 5 je zobrazen detail signálu snímače Pt100, kdy není patrné výrazné rušení. Napájení celého rozvaděče bylo vypnuté, jednotka AFE rovněž vypnutá.

Na obr. 6 je zobrazen tentýž signál se zapnutým napájení PLC a celého rozvaděče. Je patrný měřicí cyklus PLC s periodou cca 500 ms. Mimo tento cyklus PLC signály neměří. Užitečný signál na vstupu je cca 1,75 V a amplituda šumu cca 1 V. Signál tentokrát nemá stejné měřítko jako signál na obr. 5.

Na obr. 7 je zobrazena stejná situace, navíc se zapnutou AFE jednotkou. Užitečný signál zůstává stejný, šum se zvětšil. Situace s rušením u Pt100 vstupů je tedy díky vyššímu měřenému napětí výrazně lepší než u termočlánků.

Typické projevy rušení na vstupech

V řídicích systémech se běžně nepracuje pouze s jednotlivými aktuálními hodnotami vstupních signálů, ale používá se průměrovaná hodnota z většího množství dat. Tím se rušení částečně potlačí. I v tomto případě má však zapnutí nějakého spotřebiče, typicky čerpadla s motorem napájeným frekvenčním měničem, vliv na zvýšení šumu měřené veličiny (např. teploty), jak je patrné z předchozích obrázků. Tato hodnota pak může výrazněji kolísat. Celkové potlačení je pak dáno charakterem rušení, použitými AD převodníky, délkou integrace/průměrování. V nepříznivých případech se může jednat až o jednotky °C.

OPATŘENÍ K MINIMALIZACI RUŠENÍ NA SIGNÁLOVÝCH VSTUPECH

Externí převodníky na proudovou smyčku

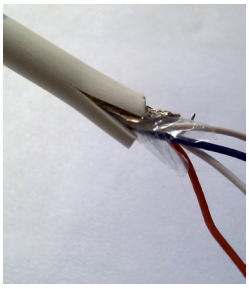
Pro omezení rušení na signálových vstupech je možné se řídit jednoduchou zásadou. Signál s malou úrovní napětí je veden jenom na nejnutnější, co nejkratší vzdálenost. Například od termočlánku ve spalovacím prostoru do převodníku umístěného vně. Co nejkratší přívod znamená i nejmenší náchylnost na rušení. V převodníku je signál převeden na proudový, případně napěťový signál (s vyšší amplitudou). Průmyslově používané standardy jsou 0 až 20 mA, resp. 4 až 20 mA či 0 až 10 V. Přenos signálu s vyšším napětím na delší vzdálenost je z hlediska rušení výhodnější než přímé připojení termočlánku. Proudový signál je ovšem z hlediska rušení podstatně odolnější než signál napěťový. Pro tyto účely existují standardně vyráběné převodníky signálu ze senzorů různých veličin na proudovou smyčku. Příklad převodníku je ukázán na obr. 8. Je možné použít i digitální sběrnice, které jsou odolnější proti rušení než analogové signály.

Obr. 8 Příklad převodníku na proudovou smyčku (převzato z [8])

Fig. 8 Example of current loop converter (taken from [8])

Stíněné kroucené kabely k senzorům

Snímače je nutné připojovat pomocí stíněných kroucených kabelů [4]. Příklad vhodného stíněného kabelu pro čtyřvodičové připojení je ukázán na obr. 9. Kabely musí být umístěné co nejdále od jakýchkoliv silových kabelů, zejména od kabelů od frekvenčních měničů. Souběh se silovými kabely je zakázaný.



Obr. 9 Stíněný kabel pro čtyřvodičové připojení snímače Pt100

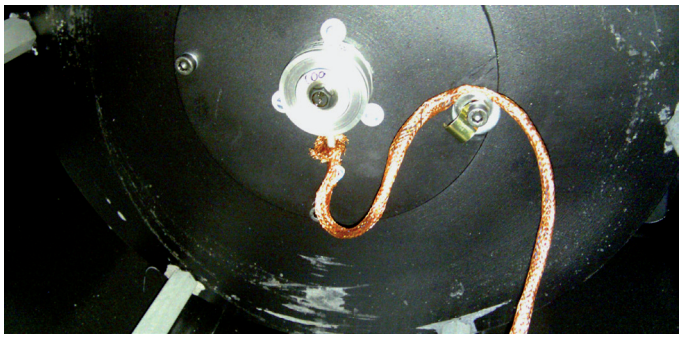
Fig. 9 Shielded cable for four-wire connection of Pt100 sensor

Připojení k PLC

- **Čtyřvodičové připojení odporových snímačů teploty**
  Pokud to PLC a použité snímače (např. Pt100) umožnují, je vhodné použít čtyřvodičové zapojení. Z hlediska rušení je odolnější než zapojení dvou- nebo třívodičové.

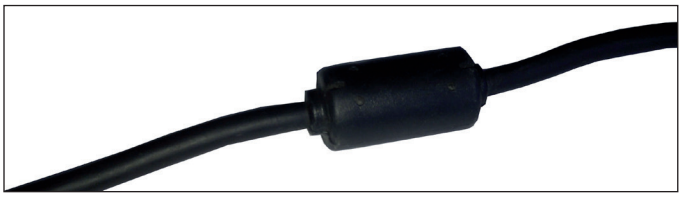
- **Nepoužívat přídavné svorky na vstupech PLC**
  Signály na vstupy PLC je nutné připojovat přímo, ne přes přídavné svorky. Zejména tehdy, jestliže z přídavných svorek je signál veden nestíněným kabelem. Stíněné kabely musí být připojeny co nejblíže k PLC, nejlépe přímo na určené svorky. Každý centimetr nestíněného kabelu navíc přinese problémy.

- **Přídavné měděné opletení signálových kabelů**
  Nestíněné signálové vodiče je možné opatřit přídavným měděným opletením [3]. Opletení se uzemní pouze na jednom konci, ideálně v rozvaděči, aby stíněním neprocházely vyrovnávací proudy. Příklad použití přídavného měděného opletení je ukázán na obr. 10. Zde se jedná o opletení signálových vodičů snímače úhlu natočení rotoru synchronního motoru. Signálové opletení je v tomto případě připojené jenom na straně motoru, na straně elektroniky připojené není.



Obr. 10 Použití přídavného měděného opletení

Fig. 10 Use of additional copper braid



Obr. 11 Napájecí kabel s feritovým filtrem

Fig. 11 Power cable with ferrite filter

- **Používat feritové filtry**
  Analogové vstupy je možné opatřit přídavnými feritovými filtry, které mohou částečně rušení potlačit [5]. Příklad kabelu s feritovým filtrem je ukázán na obr. 11. Zde je kabel filtrem osazen již z výroby. Filtry je možné koupit a osadit i dodatečně.

OPATŘENÍ K MINIMALIZACI RUŠENÍ OD FREKVENČNÍCH MĚNIČŮ

Oddělený rozvaděč pro výkonovou elektroniku a pro měření

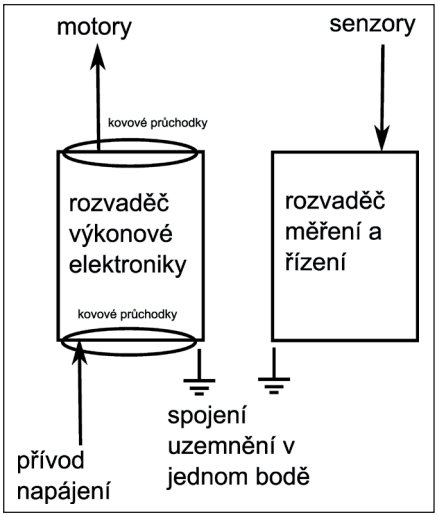
Hlavním krokem pro odstranění rušení je použití dvou vzájemně oddělených rozvaděčů. Jeden rozvaděč musí obsahovat veškerou výkonovou elektroniku, jako jsou frekvenční měniče, AFE jednotka, stykače, relé, zdroje atd. Ve druhém rozvaděči musí být samostatně umístěno PLC s veškerými analogovými vstupy ze snímačů. Při umístění ve stejném rozvaděči nejsou citlivé analogové vstupy odstíněny od velice výrazného rušení od frekvenčních měničů. Rozvaděče musí být celokovové, uzemněné a opatřené vhodnými kovovými průchodkami – viz dále. Doporučené uspořádání je znázorněné na obr. 12.

Přívod napájení a **zejména kabely od frekvenčních měničů k motorům** je třeba situovat prostorově co nejdále od kabelů senzorů a od rozvaděče měření. Spojení uzemnění obou rozvaděčů by mělo být kvalitně provedeno silnou pasovinou s co největším průřezem v **jednom jediném bodě (hvězdicové uspořádání zemnění)**. Na rozvaděčích je třeba používat kovové průchodky, zejména u kabelů od frekvenčních měničů k motorům. Pro propojení motoru a frekvenčního měniče je třeba používat stíněné kabely, kde je stínění připojené ke kovové průchodce. Celý rozvaděč musí být kompletně uzavřený. Nenechávat například volné dno rozvaděče nebo otvory bez průchodek.

Propojení frekvenčních měničů s motory

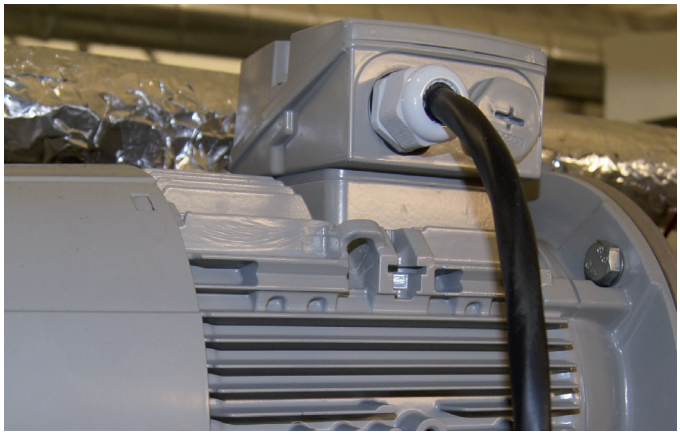
Pro připojení všech motorů k frekvenčním měničům je třeba zásadně používat stíněné kabely např. typu 2YSLCY-J 0,6/1 kV [1]. Stínění použitého kabelu musí mít co nejmenší impedanci, aby byl zajištěn co nejlepší návrat rušivých proudů k měniči co nejkratší cestou bez uzavírání cesty dalšími vodivými částmi (např. rám). Vhodné jsou proto kabely s dvojím stíněním, jako např. již zmíněný typ 2YSLCY-J. Vnitřní stínění se pak připojí k motoru i k frekvenčnímu měniči, vnější stínění se připojuje **pouze** na straně měniče.

Stínění je nutné připojit v celém obvodu, připojení ke svorce motoru musí být co nejkratší. Průchodka musí být kovová, s těsnicí vložkou z vodivého materiálu. Izolace pláště kabelu musí být odstraněná v celém obvodu tak, aby těsnicí vložka připojovala celou plochu stínění. Těsnění mezi víčkem a tělem krabice svorkovnice musí být také vodivé. Mezi průchodkou a rozvaděčem musí být odstraněna z rozvaděče barva, aby spojení bylo vodivé v celé ploše. Průchodka musí být vybavena kontaktní planžetou, která zajistí propojení stínění a rozvaděče.



Obr. 12 Doporučené uspořádání rozvaděčů

Fig. 12 Recommended layout of switchboards



Obr. 13 Nevhodné použití plastové průchodky

Fig. 13 Unsuitable use of plastic grommet

Obr. 14 Správné připojení motoru k rozvaděči, stíněný kabel, EMC průchodka

Fig. 14 Proper connection of motor to the switchboard, shielded cable, EMC grommet

Stejné opatření je nutné provést i na straně motorů. Vhodné jsou např. průchodky typu BMEM-xx s metrickým závitem, nebo typ BSEM-xx s závitem Pg [2].

Plastové průchodky jsou sice laciné, ale z hlediska EMC naprosto nevhodné. Příklad nevhodného použití plastové průchodky u asynchronního motoru napájeného frekvenčním měničem je ukázán na obr. 13. Příklad správného připojení motoru a rozvaděče je na obr. 14. Zde je použit stíněný kabel 2YSLCY-J a kovová EMC průchodka. Rozvaděč je kovový a je vodivě propojený s průchodkou a se stíněním kabelu.

Pokud to frekvenční měniče umožňují, je nutné připojit stínění kabelu k motoru přímo k frekvenčnímu měniči a jeho uzemnění přes EMC průchodku. Důležité je nepřipojovat kabely přes přídavné svorky, ale přímo k frekvenčnímu měniči.

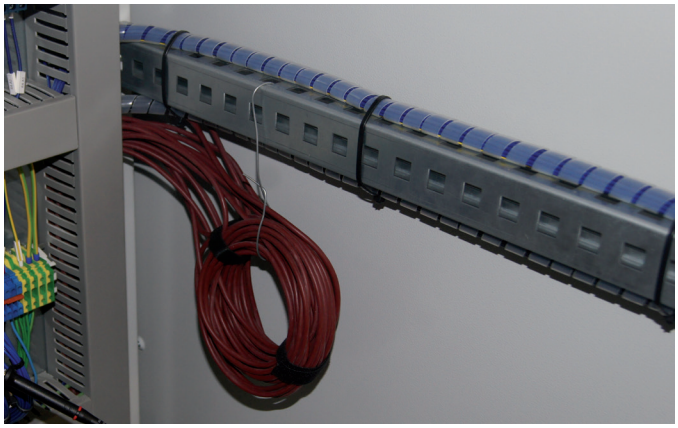
Souběh kabelů

Je nutné **zcela eliminovat jakýkoliv souběh silových kabelů a signálových kabelů** od snímačů. Nezbytné křížení s ostatními vodiči musí být pod úhlem 90°. Mezi kabely v místě křížení je nutné vložit řádně uzemněnou feromagnetickou přepážku. Bez ohledu na problémy s rušením je souběh zakázán i z hlediska bezpečnosti, pokud všechny vedle sebe uložené kabely nemají izolaci dimenzovanou na stejné napětí, tj. např. na 400 V, stejně jako silové kabely. Což většinou kabely pro snímače nemají. **Silové a signálové kabely musí být prostorově od sebe umístěné co nejdále.**

Příklad nevhodného uložení signálových a silových kabelů je ukázán na obr. 15. Kabely jsou uložené v jednom kabelovém žlabu. Dochází tak

Obr. 15 Naprosto nevhodný souběh kabelů – silové a signálové kabely v jednom žlabu

Fig. 15 Completely unsuitable cable management – power and signal cables in one tray



Obr. 16 Souběh kabelů k Pt100 a napájení rozvaděče

Fig. 16 Management of cables to Pt100 and power supply to switchboard

k rušení, viz např. obr. 4 a obr. 7. Na obr. 16 je ukázán příklad špatného uložení kabelů vedoucích do rozvaděče. V kovové liště je uloženo napájení rozvaděče a ovládání motorů. Kabel k Pt100 (červený kabel) je nestíněný a vede do kovové lišty společně se silovými kabely. Navíc je stočený ve smyčce, která funguje jako anténa. Pro správnou funkci je nezbytné, aby kabely byly co nejkratší.

Uzemnění motorů a rámu

Kostry motorů a dalších zařízení musí být připojené k ochrannému vodiči. Připojení motoru pouze šrouby k rámu nestačí (není zajištěn spolehlivý kontakt), je nutné připojení přes zemnicí svorku žlutozeleným vodičem příslušného průřezu. Na obr. 17 je ukázáno nevhodné použití matice s plastovou vložkou pro uchycení motoru k rámu, kde nebylo provedeno žádné další uzemnění. Tyto matice nezajišťují bezpečný vodivý kontakt s rámem. Všechny kovové části musí být samostatně pospojovány, nelze se spoléhat na propojení např. přes pružné části potrubí, ventily apod. Uzemnění se provádí uzemňovacími svorkami [6],[7].

U motorů napájených z frekvenčního měniče je nutné ověřit, zda je skutečně pro provoz s frekvenčním měničem určený. Při provozu motoru pro „obecné“ použití vznikají ložiskové proudy způsobené vysokými frekvencemi od pulzně šířkové modulace (PWM). Proudy mohou poškozovat ložiska. Motor určený pro provoz s frekvenčním měničem musí mít jedno ložisko izolované keramickou vložkou, případně mít hybridní ložiska s keramickými kuličkami, které izolují rotor od statoru. Z dlouhodobého hlediska to má vliv na životnost motoru.

Obr. 17 Nevhodné matice s plastovou vložkou

Fig. 17 Unsuitable nuts with plastic insert

Mezi frekvenční měniče a motory je možné zapojit sinusový filtr, který eliminuje rychlé náběžné hrany napětí. Rušení se tím podstatně zmenší, ale za cenu určitého snížení účinnosti (přídavné ztráty na filtru). Cena sinusového filtru také není zanedbatelná, může se pohybovat až ve stejné výši jako cena frekvenčního měniče.

ZÁVĚR

Článek ukázal na příkladech z praxe běžné chyby při zapojování rozvaděčů a experimentálních zařízení. Jsou ukázány zásady, které vedou k odstranění/potlačení problémů s EMC, které v mnoha případech neodborného zapojení mohou vést až k nefunkčnosti zařízení. Problematika EMC je velice komplexní, cílem článku není podrobný rozbor, ale ukázání a řešení problémů, které se zcela běžně vyskytují.

Kontakt na autora: Martin.Novak@fs.cvut.cz

Poděkování: Tento článek vznikl částečně za podpory grantů MŠMT LO1311 – – Rozvoj Centra vozidel udržitelné mobility, MŠMT ED2.1.00/03.0125 – Pořízení technologie pro Centrum vozidel udržitelné mobility a grantu ČVUT SGS15/190/ /OHK2/3T/12.

Použité zdroje:

[1] Flexibilní kabel k frekvenčním měničům, s dvojitým stíněním EMC. *Kabelyvodice.cz* [online]. 18. 1. 2017. Dostupné z: http://www.kabelyvodice.cz/kabely-vodice/02_2yslcy-j.php

[2] Kabelové průchodky EMC. *Foxel.cz* [online]. 18. 1. 2017. Dostupné z: http://www.foxel.cz/5019/

[3] Měděné opletení. *Kabelyvodice.cz* [online]. 18. 1. 2017. Dostupné z: http://www.kabelyvodice.cz/kabely-vodice/pdf/Medene_opleteni.pdf

[4] 3 and 6 wire RTD Extension Wire 24 AWG Twisted Shielded Construction. *Tcdirect.com* [online]. 18. 1. 2017. Dostupné z: http://www.tcdirect.com/deptprod.asp?deptid=270/1

[5] Feritové kabelové filtry se zámkem. *PMEC.cz* [online]. 18. 1. 2017. Dostupné z: http://www.pmec.cz/00.html

[6] Uzemňovací příchytka EMC. *Sonepar.cz* [online]. 18. 1. 2017. Dostupné z: http://shop.sonepar.cz/uzemnovaci-prichytka-emc-16mm-bal50ks/s-1564786/

[7] Zemnicí svorky. FOXEL.CZ [online]. 18. 1. 2017. Dostupné z: http://www.foxel.cz/1730/

[8] DATAXEL LLC. Universal input Transmitter DAT2015. *Datexelusa.com* [online]. 18. 1. 2017. Dostupné z: http://www.datexelusa.com/DAT2015_Universal_Input_transmitter.html