

Ekonomické řešení diagnostiky vibrací kompresoru

O. Tureček¹, J. Švarný¹, J. Hrubý¹

¹ Katedra technologií a měření, Fakulta elektrotechnická / RICE, ZČU v Plzni,
Univerzitní 8, Plzeň

E-mail : turecek@ket.zcu.cz, svarny@ket.zcu.cz, janhruby@ket.zcu.cz

Anotace:

V rámci řešení projektu MPO FR/TI-159 „Integrovaný systém pro výrobu a úpravu stlačeného vzduchu“ byl navrhován modul provozní diagnostiky vibrací točivého stroje – kompresoru, který byl vyvíjen společností Atmos Chrást s.r.o. Jedním ze základních požadavků, které bylo nutné splnit, byla velmi nízká cena celého zařízení. Výsledná cena zařízení je z velké části určena cenou použitých snímačů vibrací. Příspěvek se zabývá koncepcí diagnostického systému počínaje výběrem vhodných snímačů vibrací až po obvodové řešení diagnostické jednotky.

ÚVOD

Úkolem navrženého diagnostického systému je monitoring vibrací ve zvolených bodech soustrojí kompresoru IKS (Integrovaná Kompresorová Stanice) s cílem včasného varování před případnou poruchou stroje. Jádrem řídicího systému IKS je řídicí jednotka kompresoru. Další součástí je autonomní řídicí jednotka sušičky. Diagnostický systém je doplňující a volitelnou součástí řídicího systému stanice IKS. Všechny jednotky jsou propojeny sběrnici Modbus, která zároveň slouží ke komunikaci s výkonovým měničem motoru IKS. Řídicí jednotka plní funkci masteru, ostatní jednotky (včetně jednotky diagnostiky) pracují v režimu slave. Konstrukční řešení jednotlivých částí systému jsou popsány v [1], [2].

Pro diagnostiku vibrací je uvažováno monitorování vibrací ve dvou místech soustrojí. Případné zvýšení nebo naopak snížení počtu měřicích míst bude důsledkem dlouhodobějšího sledování stavu stroje. Dvě měřicí místa jsou v současné době především cenovým kompromisem, kdy se preferuje sledování v axiálním a radiálním směru stroje.

VÝBĚR SNÍMAČŮ

Volba vhodných snímačů vibrací ovlivňuje nejen konstrukční a obvodové řešení jednotky pro vyhodnocení vibrací, ale výrazně určuje i cenu celého zařízení. Předpokládá se nasazení na stroji poháněném elektrickým motorem s frekvenčním měničem o příkonu 30 – 50 kW (různé varianty provedení), takže jedním z omezujících parametrů je i značná úroveň elektromagnetického rušení.

Pro snímání vibrací je možné uvažovat o použití 3 typů snímačů: Akcelerometrů s napěťovým výstupem (například standardy označované jako IEPE, ICP, DeltaTron nebo CCLD), snímačů MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) nebo nestandardní použití snímačů detonačního spalování (označovaných jako „snímače klepání“) používaných v automobilech.

Akcelerometr s napěťovým výstupem je pro danou aplikaci ideální, především z důvodu nízké výstupní impedance, dostatečně lineární frekvenční závislosti citlivosti a vhodného frekvenčního rozsahu. Výhodou je dostupnost celé škály typů s různou citlivostí. Vážným omezením je však relativně vysoká cena těchto snímačů, která výrazně převyšuje požadavek na cenu celého zařízení.

Snímače MEMS představují cenově výhodné řešení. Na rozdíl od klasických akcelerometrů jsou obvykle dostupná provedení pro dvou nebo tříosová měření. Obvykle se jedná o inteligentní senzory s různým stupněm integrace pomocných elektronických obvodů (převodníky, filtrace, rozhraní). Nevýhodou je jejich mechanické provedení (čip). Pro průmyslové použití jsou tedy nutné další mechanické úpravy, především zapouzdření a vyřešení vhodného mechanického upevnění k bloku stroje. Tyto dodatečné mechanické úpravy však výrazně zhoršují linearitu frekvenční závislosti citlivosti. Prozatím nejsou zkušenosti s dlouhodobou stálostí parametrů takto upravených snímačů, což je pro použití ve vibrační diagnostice strojů zásadní požadavek.

Snímače detonačního spalování jsou vzhledem k dlouhodobému používání v automobilech mechanicky velmi solidně vyřešené a mají vhodný teplotní rozsah i dlouhodobou stálost parametrů. Nevýhodou je nejasná specifikace parametrů pro použití v dané aplikaci. V automobilech slouží ke snímání vibrací motoru ve frekvenčním pásmu s dolní mezní frekvencí obvykle 1 kHz nebo vyšší. Výrobci některých typů sice udávají parametry i při nižších frekvencích, ale nejedná se o standardní situaci. Navíc obvykle nebývá udávána frekvenční závislost citlivosti. Pro nestandardní použití těchto snímačů bylo tedy nutné provést řadu ověřovacích měření různých typů těchto snímačů.

Velkou výhodou snímačů klepání je jejich cena, která je téměř řádově nižší, než cena akcelerometrů s napěťovým výstupem.

Snímače klepání jsou standardně využívány v pásmu jednotek kHz, kde aplikace nevyžaduje zjišťovat frekvenční závislost úrovní vibrací, protože jsou obvykle určovány jen celkové úrovně vibrací v daném pásmu. Vzhledem k nestandardnímu použití

těchto snímačů pro diagnostiku vibrací je tedy nutné zjistit chování snímačů při nižších frekvencích, ověřit linearitu přenosové charakteristiky a zjistit odolnost proti elektromagnetickému rušení.

MĚŘENÍ PARAMETRŮ SNÍMAČŮ KLEPÁNÍ

Snímače klepání jsou akcelerometry s elementem pracujícím na piezoelektrickém principu. Jejich zásadní vlastností je vysoká vnitřní impedance vyžadující odpovídající řešení vstupních obvodů diagnostického systému.

Bylo provedeno srovnávací měření šesti běžně dostupných typů snímačů klepání v cenové kategorii přibližně 1000,- Kč/ks. Jednalo se o typy uvedené v tab. 1.

Tab. 1: Přehled měřených snímačů klepání

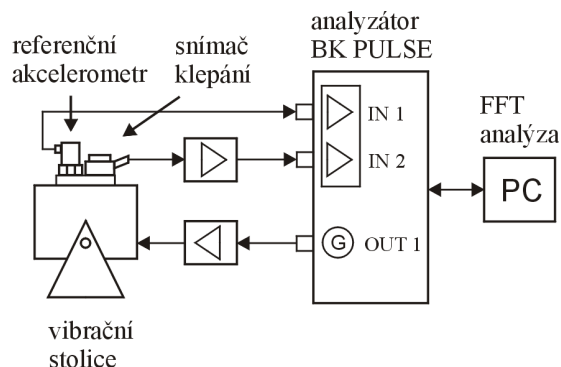
Vzorek č.	Výrobce	Typ	rozsah	citlivost [mV / g]
1	Siemens	XS 06A905377		
2	EPS	1.957.001	1 kHz - 18 kHz	27 +- 10
3	EPS	1.957.001	1 kHz - 18 kHz	27 +- 10
4	Bosch	0 261 231 006	1 kHz - 20 kHz	26 +- 8
5	Bosch	0 261 231 038	1 kHz - 20 kHz	26 +- 8
6	VDO	S 103995001Z	30 Hz - 25 kHz	35 +- 8

Pro konkrétní aplikaci v jednotce diagnostiky vibrací byly použity 2 snímače EPS, typ 1.957.001 s udávanou citlivostí 27 mV/g ± 10 mV/g a udávaným frekvenčním rozsahem 1 kHz - 18 kHz. Podrobnosti týkající se výběru snímačů detonačního spalování včetně změřených parametrů jsou uvedeny v [3].

Parametry snímačů klepání byly zjištěny porovnáním s referenčním akcelerometrem Brüel & Kjaer 4507 [4] při současném umístění na vibrační stolici RFT 11075 jako zdroji budící síly a zrychlení. Vibrační stolice byla buzena výkonovým zesilovačem Yamaha CP2000. Měření citlivosti bylo provedeno při buzení harmonickým signálem o frekvenci 300 Hz, měření frekvenční charakteristiky pak šumovým signálem. Pro vyhodnocení byl použit analyzátor Brüel & Kjaer PULSE 3560C s nastavenou metodou analýzy FFT (12800 kHz, 6400 spektrálních čar, exponenciální průměrování 500 průměrů). Schéma měřicí metody je uvedeno na obr. 1.

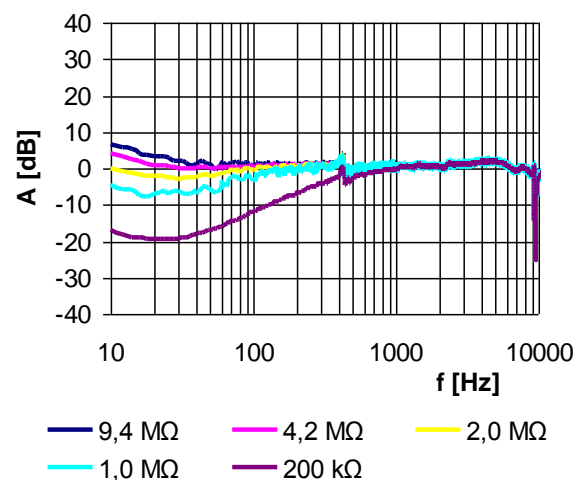
Součástí měřicího systému byl i měřicí přípravek předzesilovače pro úpravu signálu ze snímače klepání. Předzesilovač byl realizován s diferenčním vstupem, zesílením $G = 10$ a s volitelnou vstupní

impedancí. Všechna měření byla prováděna při úrovních zrychlení 1 g. Snímače klepání byly připojeny kabelem o délce 4 m.



Obr. 1: Uspořádání měřicího systému pro měření parametrů snímačů klepání

Na snímačích byla měřena celá řada parametrů. V následujícím textu jsou uvedené jen nejdůležitější z nich.

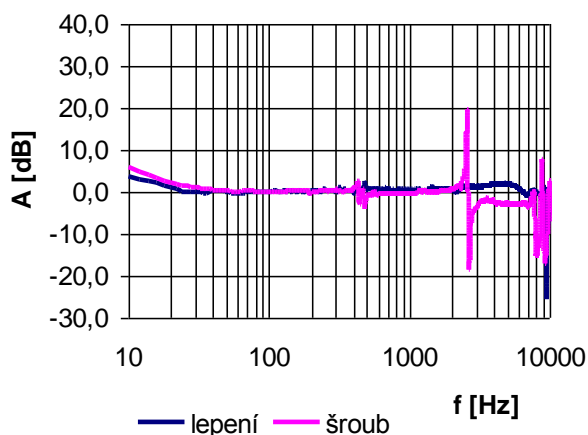


Obr. 2: Závislost frekvenční charakteristiky snímače na velikosti vstupní impedance předzesilovače

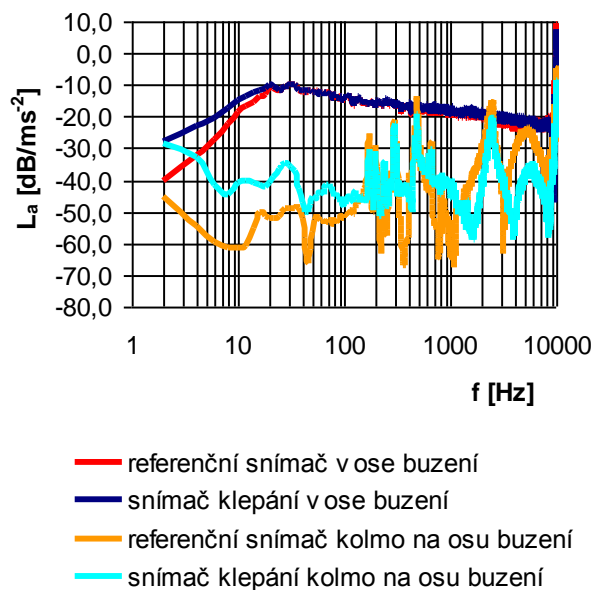
Pro použití v diagnostice vibrací je důležité dosáhnout co nejnižší dolní mezní frekvence řetězce snímač – předzesilovač. Zároveň je žádoucí dosažení co nejnižší vstupní impedance předzesilovače z důvodu co nejlepší odolnosti proti průniku elektromagnetického rušení. Na obr. 2 jsou uvedené změřené relativní frekvenční charakteristiky řetězce snímač – předzesilovač pro různou velikost vstupní impedance. Z měření je patrné, že nejnižší možnou hodnotou velikosti vstupní impedance je 1 MΩ.

Při většině prováděných měření byly snímače k vibrační stolici nebo k dalším přípravkům, které realizovaly uchycení k vibrační stolici připevněny lepením. Vzhledem k tomu, že v praxi budou snímače uchyceny pomocí šroubu, byl sledován i vliv uchycení snímače pomocí šroubu. Bylo realizováno

uchycení snímače šroubem M6. Vliv způsobu upevnění snímače na změnu frekvenční charakteristiky je zobrazen na obr. 3. Z výsledků měření je patrná nutnost omezení frekvenčního pásma přibližně do 2 kHz. Tento požadavek není v rozporu s požadovanou šířkou pásma, ve kterém budou sledovány vibrace stroje.



Obr. 3: Deformace frekvenční charakteristiky vlivem způsobu upevnění snímače

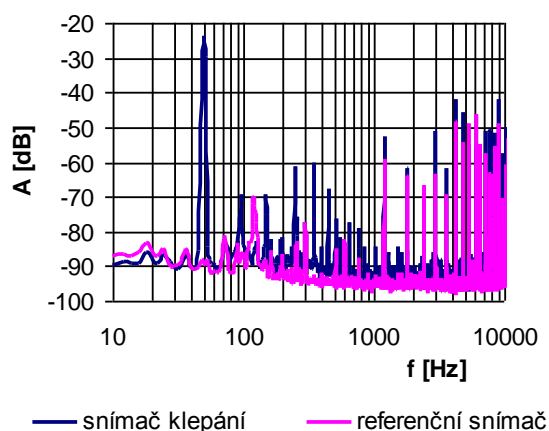


Obr. 4: Zjištění směrových vlastností porovnáním s referenčním akcelerometrem

Pro zjištění směrových vlastností snímače klepání bylo provedeno porovnání frekvenční závislosti změřeného zrychlení snímačem klepání a referenčním akcelerometrem s napěťovým výstupem BK 4507. Pro měření byl realizován přípravek upevněný k vibrační stoličce, který umožňoval připevnění obou snímačů jak v ose buzení, tak kolmo na osu buzení. Vzhledem k uchycení přípravku k hliníkové konstrukci vibrační stoličce nebylo možné vyloučit ani eliminovat vibrace i v kolmém směru na osu buzení.

Z toho důvodu bylo provedeno pouze porovnání spekter zrychlení jak v ose buzení, tak mimo osu buzení jednak snímačem klepání a jednak referenčním akcelerometrem.

Z naměřených výsledků (obr. 4) je patrná velmi solidní shoda směrových vlastností referenčního akcelerometru i snímače klepání. Výrazné rezonanční špičky na frekvenční závislosti složky zrychlení kolmé na osu buzení jsou důsledkem vlastních kmitů přípravku, který byl upevněn na vibrační stoličce. Rozdíl v charakteristice zrychlení v oblasti vyšších frekvencí ve směru kolmém na osu buzení je zřejmě důsledkem větších rozměrů a hmotnosti snímače klepání a tím i jiného uchycení (na větší ploše) proti referenčnímu akcelerometru.



Obr. 5: Ukázka úrovně elektromagnetického rušení

Vzhledem k vysoké vstupní impedanci předzesilovače bylo možné předpokládat náchylnost celého měřicího řetězce na elektromagnetické rušení. Z tohoto důvodu byla provedena řada měření spekter výstupního napětí předzesilovače s připojeným snímačem klepání. Byla provedena jednak měření v modelové situaci s přítomností značného elektromagnetického rušení, kdy jako modelová situace bylo zvoleno soustrojí motoru pohánějícího alternátor, které je dostupné jako výuková pomůcka na ZČU FEL, Katedře výkonové elektroniky a pohonů. Motor o příkonu 11 kW byl napájen z frekvenčního měniče, kdy celá soustava je zdrojem elektromagnetického rušení značných úrovní. Měření probíhalo pro různé velikosti vstupní impedance a různá zesílení předzesilovače.

Měření rušení pronikajícího do sestavy snímač klepání – kabel – předzesilovač bylo provedeno i na prototypu kompresorové stanice IKS v různých režimech její činnosti. Bylo sledováno spektrum výstupního napětí z vybraného snímače klepání připojeného k předzesilovači a spektrum výstupního napětí referenčního akcelerometru BK4507. Předzesilovač měl zvolenou velikost vstupní impedance 1 MΩ a zesílení $G = 10$. Motor stroje IKS byl napájen z měniče a stroj byl provozován při různých otáčkách a různém zatížení.

Na obr. 5 je ukázka úrovní rušivého signálu pronikajícího do obou snímačů na stroji IKS při zapnutém měniči, ale nulových otáčkách motoru. Z provedených měření je patrné, že úroveň rušení leží ve většině případů výrazně pod úrovní signálu odpovídajícího měřeným vibracím. Jedinou výjimkou je výrazná úroveň rušení na frekvenci 50 Hz u snímače klepání, což je nutné akceptovat při návrhu měřicí metody s tímto typem snímače.

PŘÍKLAD APLIKACE

Poznatky získané při testování snímačů byly následně využity při návrhu diagnostické jednotky DSU (Diagnostic System Unit) kompresorové stanice IKS. Diagnostický systém byl navržen jako doplňující a volitelná součást řídicího systému stanice IKS. S ostatními jednotkami systému je jednotka DSU propojena sběrnici Modbus.

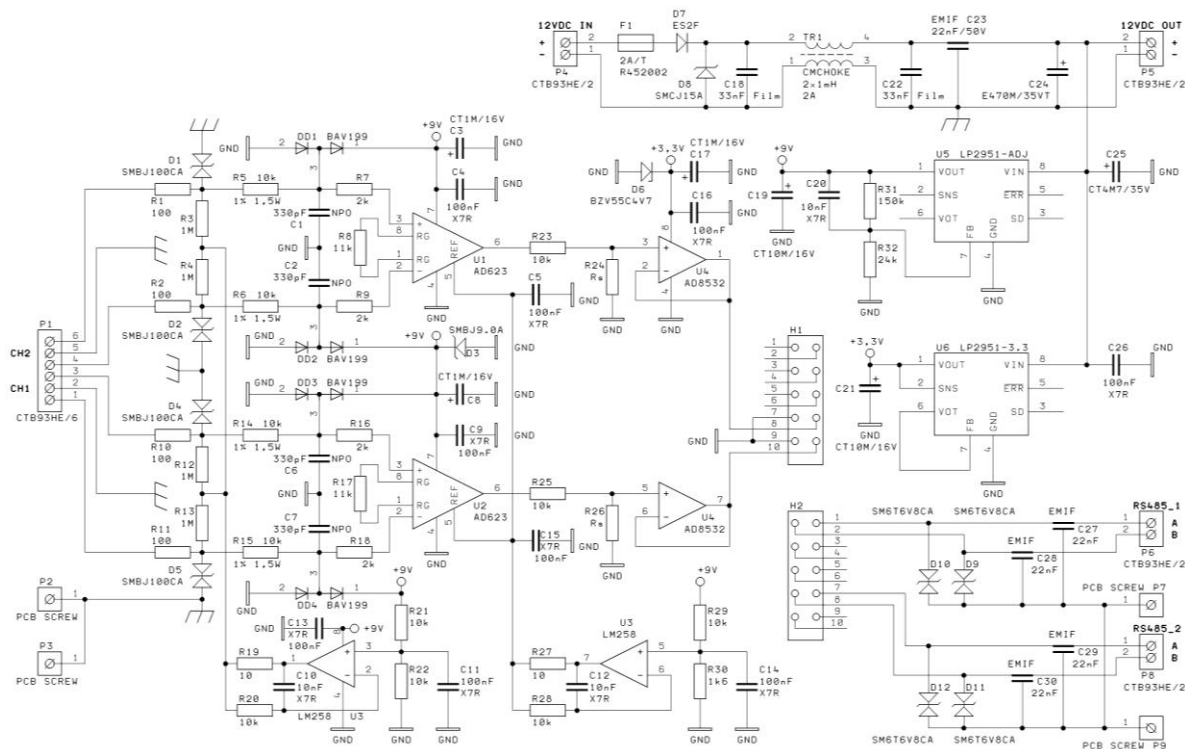
Jádro diagnostické jednotky tvoří jednodeskový mikro počítač TS7350 [5] vybavený procesorem ARM9. Počítač je doplněn rozšiřující kartou analogových vstupů a výstupů TS9700 [6] z níž jsou využívány 2 kanály 12-bitového A/D převodníku. Napěťový rozsah vstupů je 0 – 2,5 V. Maximální vzorkovací rychlost převodníku je 100 kSa/s. Mezní frekvence analogových vstupů je vnějším filtrem nastavena na 10 kHz, což je pro potřeby aplikace zcela postačující.

Výpočetní jádro diagnostické jednotky muselo být doplněno modulem DPM01 (Diagnostic Pre-amplifier Module). Modul DPM01 tvoří rozhraní diagnostického systému a nastavbu nad kartou A/D převodníků jádra. Kromě obvodů pro úpravu signálů ze 2 snímačů vibrací jsou zde soustředěny obvody pro filtraci napájení a přepět'ové ochrany budičů rozhraní RS485.

Snímače vibrací jsou připojeny na společném 6-pinovém konektoru P1. Topologie signálových cest je pro oba snímače identická. Snímač 1 je připojen na piny 1, 2, 3 konektoru P1. Na pin P1-2 je připojeno stínění přívodního kabelu. Piny P1-1 a P1-3 jsou signálové. Signál ze snímače u_{sens} je zesilován přístrojovým zesilovačem U2, AD623 [7]. Zesílení zesilovače je nastaveno rezistorem R17 přibližně na hodnotu 10 viz (1).

$$G = \frac{100}{R_s} + 1 = 10,1 \quad (1)$$

Vstupní zesilovače U1, U2 jsou napájeny napětím +9 V z výstupu regulátoru U5, LP2951ADC. Z úrovně +9 V je pomocí U3, LM258 [8] odvozeno napětí 1,24 V pro referenční vstupy AD623 a napětí 4,5 V definující úroveň souhlasného signálu na vstupech AD623.



Obr. 6: Schéma zapojení DPM01

$$u_o = u_{sens} \cdot G + U_{REF}, \quad (2)$$

$$\text{kde } U_{REF} = \frac{R_{30}}{R_{29} + R_{30}} \cdot 9 = 1,24V \quad (3)$$

Napětí u_o (2) z výstupu zesilovače U2 je vedeno do vstupu 5 sledovače U4, AD8532 [9] a odtud přes konektor H1 na kanál 1 A/D převodníku umístěného na kartě TS9700. Sledovač U4 pracuje jako buffer antialiasing RC filtru A/D převodníku. Napěťový rozsah kanálu 1 na kartě TS9700 je 0 - 2,5 V. Přepěťová ochrana analogového vstupu na kartě TS9700 je tvořena pouze rezistorem 124 Ω a dvojitou diodou BAT54. Ochranný rezistor však není dostatečně dimenzován na větší proudové zatížení.

Problém ochrany vstupu A/D převodníku je řešen sledovačem U4. Buffer U4 je napájen ze samostatného zdroje 3,3 V (U6, LP2951-3.3). Přístrojový zesilovač U2 může v případě extrémně silného signálu ze snímače (popř. v důsledku poruchového stavu, přepětí na vstupu apod.) vygenerovat na svém výstupu napětí až 9 V. Tento signál je však limitován stupněm U4. Zesilovač AD8532 je typu rail-to-rail a rozkmit jeho výstupního napětí zcela pokrývá dynamický rozsah A/D převodníku. Zároveň na jeho výstupu nemůže být vygenerováno větší napětí než 3,3 V. Pokud napětí na vstupu 5 obvodu U4 překročí hodnotu 3,3 V o více než 0,6 V dojde k otevření přepěťové ochrany vstupu (vnitřní dioda proti napájecí větvi 3,3 V). Vstupní proud je pak omezen rezistorem R25. Hodnota R25 zajišťuje vstupu U4 odolnost proti přepětí až do úrovně 50 V. V případě, že poruchový proud přesáhne hodnotu napájecího proudu zesilovače U4, dojde k otevření Zenerovy diody D6. Dioda D6 zajistí napěťové omezení pod úrovní maximální hodnoty povoleného napájecího napětí U4.

Ochrana vlastního vstupu pro připojení snímače je rozdělena do tří stupňů. Primární přepěťovou ochranou tvoří dvojice bipolárních transilů D4, D5, SMBJ100CA. Rezistory R10 a R11 jsou typu "antisure" a rozkládají případnou výkonovou ztrátu při přepětí. Prahové napětí transilů se však nachází v rozmezí 110 - 120 V. (Transily s nižší hodnotou prahového napětí nebylo možné použít z důvodu nezanedbatelného svodu a vysoké parazitní kapacity. Jejich použitím by se výrazně snížila citlivost snímače a omezil frekvenční rozsah vstupu.)

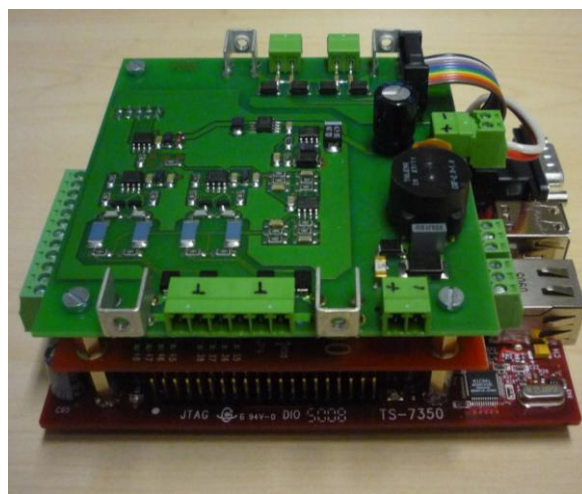
Úkolem vstupního obvodu R14, R16, DD3, R15, R18, DD4 je chránit vstupy zesilovače U2 až do úrovně, při které dochází k otevření transilů D4 a D5. Samotné rezistory R16, R18 jsou schopny ochránit vstupy zesilovače až do vstupního napětí cca 30 V. Dvojitě diody DD3 a DD4, BAV199 přebírají část poruchového proudu, který tak neprotéká vnitřními ochrannými diodami zesilovače. Stupeň R14, R15 zvyšuje napěťovou odolnost vstupu na cca 130 V trvalého zatížení (Jmenovitá výkonová ztráta rezistorů je 1,5 W.). Poruchový proud se v případě vyšší hodnoty může uzavírat přes unipolární transil

D3, SMBJ9.0A, který zamezí zvýšení napětí napájecího vstupu nad povolenou mez.

Jednotka disponuje dvěma samostatnými výstupy RS485. Výstupy jsou přístupné na konektorech P6, P8. Rozhraní jsou chráněna přepěťovými ochranami v podobě bipolárních transilů D9, D10, D11, D12, SM6T6V8A. Imunita vůči rušení je zvýšena použitím průchodkových kondenzátorů C27, C28, C29, C30, NFM3DP. Vlastní budiče rozhraní RS485 jsou implementovány na kartě mikropočítače TS7350 a s modulem DPM01 jsou propojeny prostřednictvím konektoru H2.

Jednotka DSU01 je navržena pro monitorování vibrací v axiálním a v radiálním směru stroje, kdy provádí FFT analýzu signálu z obou snímačů. Neuvažuje se analýza přechodových stavů stroje ani analýza vibrací krátkodobého charakteru, cílem je sledování dlouhodobějších ustálených stavů stroje. Z tohoto důvodu není nutné provádět analýzu vibrací v reálném čase, ale frekvenční analýza i další vyhodnocení signálu probíhá vždy po navzorkování signálu na obou kanálech, kdy během zpracování vzorkování signálu neprobíhá. Diagnostika využívá informaci o aktuálních otáčkách motoru stroje, které jsou získávány z řídicí jednotky CDU pomocí sběrnice Modbus.

Pro sledování stavu stroje z vyhodnocování vibrací je prováděno porovnávání částí amplitudových frekvenčních spekter zrychlení měřených v ustálených stavech s referenčními spektry, která jsou změřena po záběhu stroje. Aby bylo možné porovnávat úroveň vibrací i při různých otáčkách motoru, jsou získaná amplitudová spektra zrychlení parametrizována a dlouhodobě se sleduje a ukládá stav pouze těchto parametrů. Parametrizace spekter je prováděna na základě znalostí otáčkových frekvencí jednotlivých částí stroje, které vychází především ze znalosti rozměrů a typů použitých ložisek.



Obr. 7: Diagnostická jednotka DSU01

ZÁVĚR

Modul DSU01 je velmi levným řešením provozní diagnostiky vibrací využívající nestandardním způsobem snímače detonačního spalování. To s sebou přináší některá omezení, například nižší citlivost snímačů, potřeba vysoké vstupní impedance následujícího předzesilovače a tím i horší odolnost proti elektromagnetickému rušení, které je nejvíce patrné na frekvenci 50 Hz. To je nutné akceptovat při návrhu metody vyhodnocení vibrací. Naopak významnou výhodou těchto snímačů je solidní linearita frekvenční závislosti citlivosti, mechanické provedení i teplotní rozsah. Nejzásadnější výhodou je však cena snímačů detonačního spalování, která je proti průmyslovým akcelerometrům s napěťovým výstupem téměř řádově nižší, takže pro řadu levných aplikací v diagnostice vibrací mohou být tyto snímače i přes popsaná omezení použitelné.

Navržené řešení diagnostické jednotky bylo aplikováno v prototypu integrované kompresorové stanice IKS. První poznatky z implementace zařízení naznačují, že řešení by mohlo být vyhovující. V současné době probíhají dlouhodobé provozní zkoušky zařízení.

PODĚKOVÁNÍ

Práce na vývoji řídicí jednotky kompresoru byly podporovány z projektu Ministerstva průmyslu a obchodu ČR MPO-FR-TI1/159 "Integrovaný systém pro výrobu a úpravu stlačeného vzduchu".

Tento příspěvek vznikl s podporou Evropského fondu pro regionální rozvoj a Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu Regionální inovační centrum elektrotechniky (RICE), číslo projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0094.

LITERATURA

- [1] Švarný, J., Krivánka, D.: Řídicí jednotka kompresorové stanice, CDU03, výzkumná zpráva, ZČU Plzeň, 2011
- [2] Švarný, J., Krivánka, D.: Řídicí jednotka sušičky, DDU04, výzkumná zpráva, ZČU Plzeň, 2011
- [3] Tureček, O., Hrubý, J.: Možnosti použití snímačů detonačního spalování pro diagnostiku točivých strojů, výzkumná zpráva, ZČU Plzeň, 2011
- [4] Brüel & Kjaer: Miniature DeltaTron Accelerometers - Types 4507 and 4508, Product Data, www.bksv.com
- [5] Technologic Systems, Inc.: TS-7350/TS-7370 Manual, Data Sheet, www.embeddedarm.com
- [6] Technologic Systems, Inc.: TS-9700 Manual, Data Sheet, www.embeddedarm.com

- [7] Analog Devices, Inc.: Single-Supply, Rail-to-Rail, Low Cost Instrumentation Amplifier, AD623, www.analog.com
- [8] National Semiconductor, Inc.: LM158/LM258/LM358/LM2904 Low Power Dual Operational Amplifiers, Data Sheet, www.national.com
- [9] Analog Devices, Inc.: Low Cost, 250 mA Output, Single Supply Amplifiers, AD8531/AD8352/AD8534, www.analog.com