



|                                                                                                                                                                                 |                                                  |              |                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------|---------------------|
| Monitorovací jednotka pro proaktivní údržbu stroje - FW10010457-V2                                                                                                              |                                                  |              |                     |
| ROK: 2025                                                                                                                                                                       | Projekt: FW10010457                              | REVIZE Č.: 1 | DATUM: 17. 12. 2025 |
| Výzkum a vývoj monitorovací jednotky obráběcích strojů pro podporu proaktivní údržby                                                                                            |                                                  |              |                     |
| Program: FW – TREND, Podprogram 1 "Technologičtí lídři"                                                                                                                         |                                                  |              |                     |
| Veřejná soutěž: 10. veřejná soutěž programu TREND                                                                                                                               |                                                  |              |                     |
| Hlavní příjemce:                                                                                                                                                                | TAJMAC-ZPS, a.s.                                 |              |                     |
| Další účastník:                                                                                                                                                                 | SVS FEM, s.r.o.<br>Vysoké učení technické v Brně |              |                     |
| Tvůrci zprávy:<br>Ing. Martin Machálka (TAJMAC-ZPS)<br>Ing. Petr Smrčka (TAJMAC-ZPS)<br>doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D. (VUT v Brně)<br>doc. Ing. Michal Holub, Ph.D. (VUT v Brně) |                                                  |              |                     |



## Anotáční list

|                          |                                                                                                                                                                                                                    |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Název výsledku česky:    | Monitorovací jednotka pro proaktivní údržbu stroje                                                                                                                                                                 |
| Název výsledku anglicky: | Monitoring unit for proactive machine maintenance                                                                                                                                                                  |
| Označení výsledku:       | FW10010457-V2                                                                                                                                                                                                      |
| Typ výsledku dle RIV:    | G <sub>funk</sub> – Funkční vzorek                                                                                                                                                                                 |
| Pracoviště:              | TAJMAC-ZPS, a.s., Vysoké učení technické v Brně, SVS FEM, s.r.o.,                                                                                                                                                  |
| Jméno autorů zprávy:     | Ing. Martin Machálka (TAJMAC-ZPS)<br>Ing. Petr Smrčka (TAJMAC-ZPS)<br>doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D. (VUT v Brně)<br>doc. Ing. Michal Holub, Ph.D. (VUT v Brně)                                                      |
| Číslo a název projektu:  | FW10010457 – Výzkum a vývoj monitorovací jednotky obráběcích strojů pro podporu proaktivní údržby                                                                                                                  |
| Rok:                     | 2025                                                                                                                                                                                                               |
| Rozsah práce:            | 16 stran, 18 obrázků, 0 tabulek, 0 příloh                                                                                                                                                                          |
| Klíčová slova česky:     | EDGE, obráběcí stroje, predikce, trvanlivost, údržba                                                                                                                                                               |
| Klíčová slova anglicky:  | EDGE, machine tools, prediction, durability, maintenance                                                                                                                                                           |
| Anotace česky:           | Funkční vzorek monitorovací jednotky pro proaktivní údržbu stroje se softwarovou nadstavbou umožňuje vysokofrekvenční i nízkofrekvenční sběr dat.                                                                  |
| Anotace anglicky:        | A functional prototype of a monitoring unit for proactive machine maintenance with a software add-on enables both high-frequency and low-frequency data collection.                                                |
| Místo uložení výsledku:  | TAJMAC-ZPS, a.s.<br>třída 3. května 1180<br>763 02 Zlín, Malenovice<br>Česká republika                                                                                                                             |
| Licence a využití        | Výstup naplňuje podstatu obchodního tajemství. Proto v souladu se zněním §12a bod 2 zákona č. 130/2002 Sb. nebude zdrojový kód veřejně přístupný. K využití výsledku jiným subjektem je vždy nutné nabytí licence. |



## Obsah

|                                                                                            |   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| Výzkum a vývoj monitorovací jednotky obráběcích strojů pro podporu proaktivní údržby ..... | 0 |
| 1 Seznam autorů výsledku a podíly partnerů výsledku:.....                                  | 1 |
| 1.1 TAJMAC-ZPS: .....                                                                      | 1 |
| 1.2 VUT v Brně: .....                                                                      | 1 |
| 2 Úvod .....                                                                               | 2 |
| 3 Obecný popis.....                                                                        | 3 |
| 4 Technický popis funkčního vzorku.....                                                    | 5 |
| 4.1 Podrobný popis.....                                                                    | 5 |
| 4.2 Fotodokumentací .....                                                                  | 5 |
| 4.2.1 Funkční vzorek.....                                                                  | 5 |
| 4.2.2 Schéma zapojení Funkčního vzorku.....                                                | 7 |
| 4.2.3 Ukázky ze zkoušek .....                                                              | 9 |



# 1 Seznam autorů výsledku a podíly partnerů výsledku:

## TAJMAC-ZPS:

Ing. Martin Machálka

Ing. Petr Smrčka

### 1.1 VUT v Brně:

Ing. Adam Jelínek

Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

Ing. Daniel Zuth, Ph.D.

Ing. Daniel Klíč

Ing. Jiří Tůma, Ph.D.

Ing. Tomáš Marada, Ph.D.

prof. Dr. Jiří Marek

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.

doc. Ing. Michal Holub, Ph.D.

## 2 Úvod

Novost řešení spočívá v nasazení a využití digitálního dvojčete pro proaktivní údržbu, která zákazníkům umožní lépe a efektivněji provozovat jejich stroje formou vhodných aktivních (preventivních) zásahů v průběhu provozu stroje a výrobci TAJMAC-ZPS nově umožní sbírat informace o způsobu zatěžování svých produktů, následně je lépe (environmentálně efektivněji) navrhovat a nabízet nové modely služeb zákazníkům, které jsou součástí dlouhodobé strategie digitální transformace procesů v TAJMAC-ZPS.

Funkční vzorek monitorovací jednotky pro proaktivní údržbu stroje se softwarovou nadstavbou umožňuje vysokofrekvenční i nízkofrekvenční sběr dat, tj. sběr dat se vzorkovací frekvencí až 2 ms v omezeném počtu kanálů, které jsou dány samotným použitým hardwarem. S rozšířením sběru dat z tzv. selftestů je možné zpřesnit aktuální stav komponent založený na analýze vibrací a teploty komponent.

Zkoušky realizované na funkčním vzorku aplikovaném na stroji MCG1000 a MCH1000 prokazují vhodnost pro použití zařízení s předpokladem přechodu z aktuálně ukončené verze EDGE Device, Simatic Microbox PC (Siemens) na aktuální verzi Simatic EDGE (Siemens).

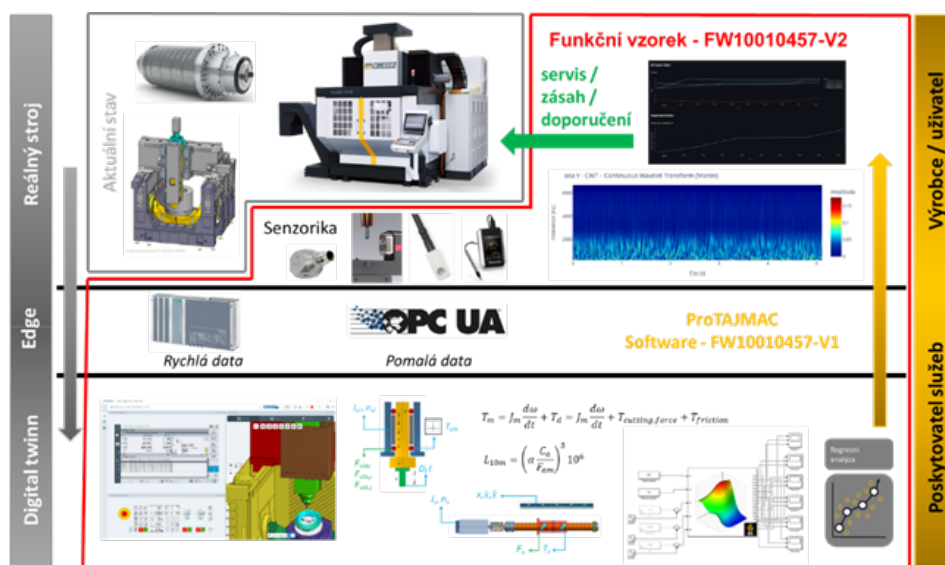
### 3 Obecný popis

Predikce opotřebení komponent strojních zařízení založených na provozních datech je vysoce aktuální téma, které cílí jak na uživatele strojních zařízení, tak umožňuje získat informace o zatěžování stroje.

Získání takovýchto dat umožňují tzv. EDGE zařízení. Takovéto zařízení musí být nejen kompatibilní s řídicím systémem stroje, ale současně musí disponovat dostatečným výkonem a rychlostí přenosu dat.

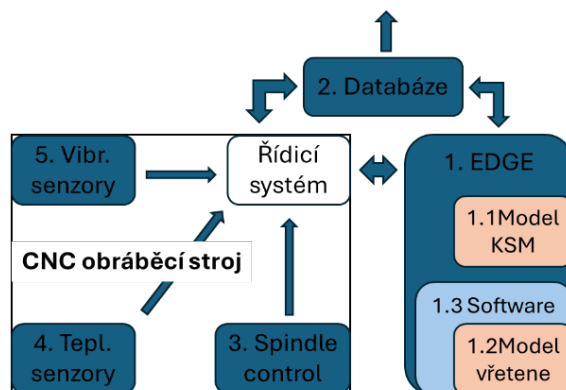
V kombinaci s dalšími měřicí aparaturou jako je analýza vibrací, double ballbar, kapacitní snímače a teplotní snímače je možné sestavit monitorovací zařízení pro predikci zbytkové trvanlivosti vybraných komponent a směřovat k proaktivní údržbě stroje.

Na Obr. 1, Obr. 3 a Obr. 4 jsou znázorněny vazby mezi výsledky, funkčním vzorkem a datovým tokem u navrženého digitálního dvojčete. To využívá prvky z reálného stroje s integrovaným Funkčním vzorkem a Softwarem, které zajišťují přenos rychlých (vysokofrekvenčních) a pomalých (nízkofrekvenčních) dat, do digitálního objektu, ve kterém probíhají potřebné výpočty a analýzy. Následně jsou data graficky interpretována a na jejichž základě může uživatel či výrobce učinit příslušné opatření ve formě servisního zásahu (výměna komponent, seřízení) nebo změnu provozních podmínek.



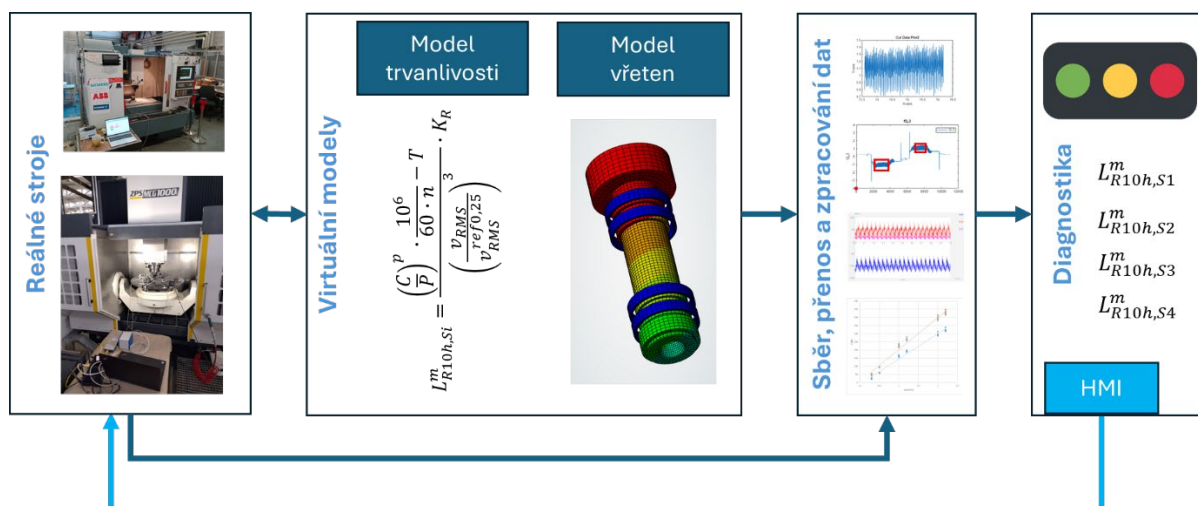
Obr. 1 Provázanost mezi výsledky projektu, vrstvami a uživateli.

Na Obr. 2 je znázorněno schéma funkčního vzorku, který se skládá ze zařízení EDGE, na kterém probíhá sběr dat a komunikuje s rozhraním pro výpočet dílčích úkolů pro posuzování vřetene a kuličkového šroubu s maticí. Přes řídicí systém stroje komunikuje a synchronizuje data z dalších zařízení a senzorů nezbytných pro výpočet zbytkových trvanlivostí. Data jsou potom zasílána do databáze, kde probíhají výpočty a vrací se data zpět na HMI stroje nebo dále do systému výrobce / uživatele.



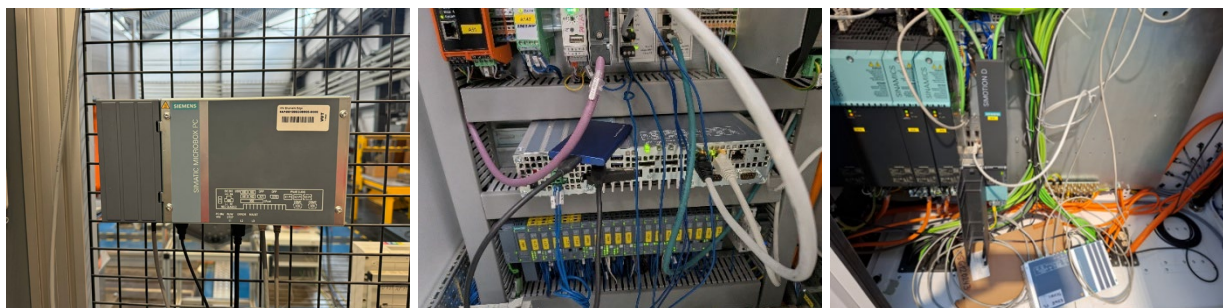
Obr. 2 Schéma funkčního vzorku

Na Obr. 3 je znázorněn datový tok se zpětnou vazbou do stroje.



Obr. 3 Znázornění datového toku u jednotlivých kategorií digitálního dvojčete založeném na funkčním vzorku.

Na Obr. 4 je znázorněna instalace EDGE zařízení Siemens na strojích MCV 754QUICK (VUT v Brně) – vlevo, MCG100 (TAJMAC) – uprostřed a MCH1000 (TAJMAC) – vpravo.



Obr. 4 EDGE zařízení na strojích zleva - MCV, MCG a MCH.



## 4 Technický popis funkčního vzorku

### 4.1 Podrobný popis

Aplikace monitorovací jednotky pro proaktivní údržbu (ProEdgeTAJMAC) je navržena na základě sběru provozních dat (zejména vysokofrekvenčních) v kombinaci s tzv. selftest měřeními pro zpřesnění predikce zbytkové trvanlivosti vybraných komponent CNC obráběcích strojů.

- Výpočet modifikované zbytkové trvanlivosti vřetene  $L_{R10h, Si}^m$  probíhá na základě sestavených FMU modelů komunikující přes software ProTAJMAC.
- Možnost vkládat více modelů vřeten.
- Výpočet modifikované zbytkové trvanlivosti kuličkového šroubu  $L_{R10h, Ai}^m$  probíhá na základě modifikovaného Archardova modelu opotřebení.
- Sběr dat probíhá na základě komunikace EDGE s řídicím systémem CNC obráběcího stroje a dále pomocí komunikačního protokolu OPC UA.
- Možnost sběru dat až 75 proměnných
- Frekvence ukládání 2 ms
- Zpracovaná korekce chyby časové synchronizace
- Průměrná denní zpracovaná data z 1 CNC obráběcího stroje 800 MB
- Optimalizace ukládání datového souboru v průměru na 230 MB, 11 000 000 x 22 databáze za den
- Doba zpracování dat 1x denně v průměru 23 min.
- Aktualizace výpočtu 1x denně.
- Výpočet pouze vřetena strojů a lineární osy s kuličkovým šroubem.
- Spindle control analýza
- Definované Selftesty s časovým prostorem přibližně 5 min.
- Navrženo s možností rozšiřování výpočetního modelu

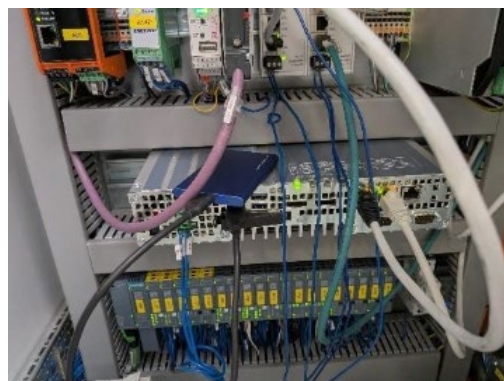
### 4.2 Fotodokumentací

#### 4.2.1 Funkční vzorek

Funkční vzorek byl testován na dvou strojích instalovaných v prostorách výroby TAJMAC-ZPS, a.s. Jednalo se o CNC obráběcí stroje MCG1000 a MCH1000. Z důvodu maximální univerzálnosti byly vybrány stroje s rozdílnými řídicími systémy Siemens a s rozdílnou úrovní diagnostického vybavení. Vzhledem k dlouhodobé nedostupnosti zařízení Simatik Edge byly funkční vzorky osazeny dočasně zapůjčenou technikou Sinumeric Edge, která již není podporovaná firmou Siemens.

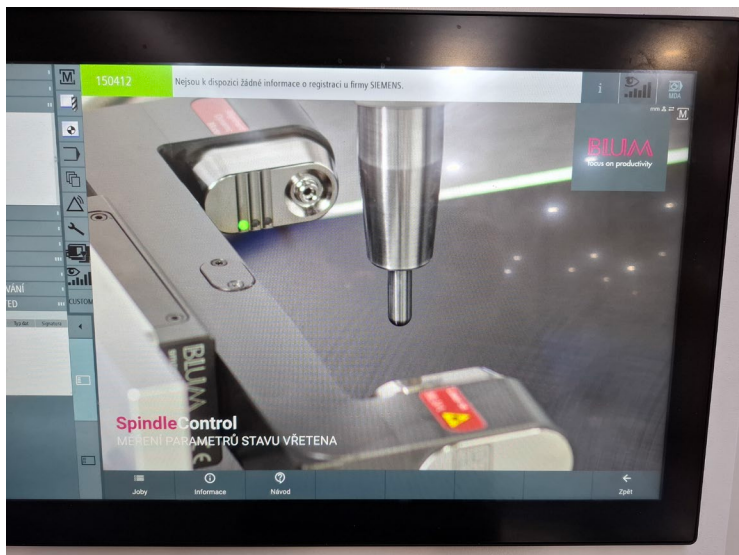
Stroj MCG1000, v.č. V390C0197 (Obr. 5) je ve standardním provedení. Jedná se o 5ti osé frézovací centrum s dvouosou řízenou frézovací hlavou od dodavatele Kessler. Řízená hlava je osazena snímači teplot ložisek a vibrodiagnostickou jednotkou. Dále byl stroj rozšířen o analýzu vibrací BLUM za účelem zvýšení stupně automatizace selftestů spojených s EDGE technologií.

Funkční vzorek Monitorovací jednotky pro proaktivní údržbu stroje se skládá z EDGE zařízení, softwaru zpracovávající data, selftestů a příslušných fyzických periférií pro analýzu vibrací, teploty a komunikaci.



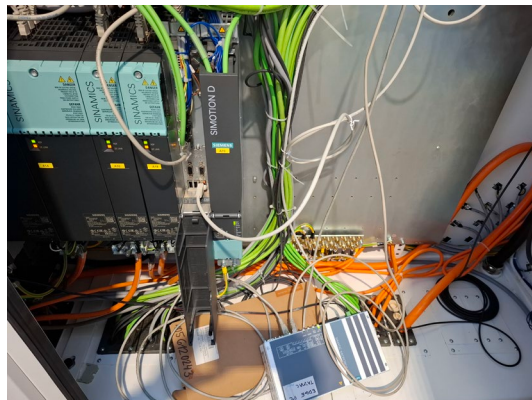
Obr. 5 CNC obráběcí stroj MCG1000.

Vzhledem k neznalosti přesného rozmístění čidel a jejich parametrů vřetena Kessler, byl stroj dovybaven opcí měření vibrací a analýzy vřetena pomocí nástrojové sondy od firmy Blum. Nástrojová laserová sonda Blum je ve standardní výbavě stroje, stroj byl doplněn o vyvážený kalibr a doplňkový software Spindle Control ver. V1D (Obr. 6).



Obr. 6 Spindle Control ver. V1D.

Stroj MCH1000i, v.č. V440C (Obr. 7) je ve standardním provedení osazen vibrodiagnostikou vřetene IFM a teplotními snímači PT100 pro kontrolu ložisek vřetene. Stroj byl doplňkově rozšířen o vibrodiagnostiku kuličkového šroubu osy „Z“ a vřeteníku. Na stroji byly doplněny teplotní čidla kuličkové matice osy „Z“ a podél lineárního vedení osy „Z“. Osa „Z“ byla vybrána z důvodu častějšího výskytu závad a možnosti brzké identifikace možného poškození. Na stroji bude realizován vývoj rozšířeného algoritmu zbytkové životnosti kuličkového šroubu. Pro identifikaci vibrací a sběr teplot bylo použito zařízení IFM, které je schopné kontinuálního sběru nativních dat ze stroje. Tato data budou sdílena s daty z NC a PLC systému stroje a shromažďována pomocí technologie Edge na cloudovém úložišti.



Obr. 7 CNC obráběcí stroj MCH1000.

V prosinci 2025 dodala společnost Siemens dlouho očekávané zařízení Simatic Edge (Obr. 8). Bohužel všechny doposud připravené naprogramované funkce jsou nekompatibilní s novým zařízením. Na původním funkčním vzorku budou nejprve dokončeny všechny plánované testovací práce a teprve následně bude zahájena integrace nových zařízení.

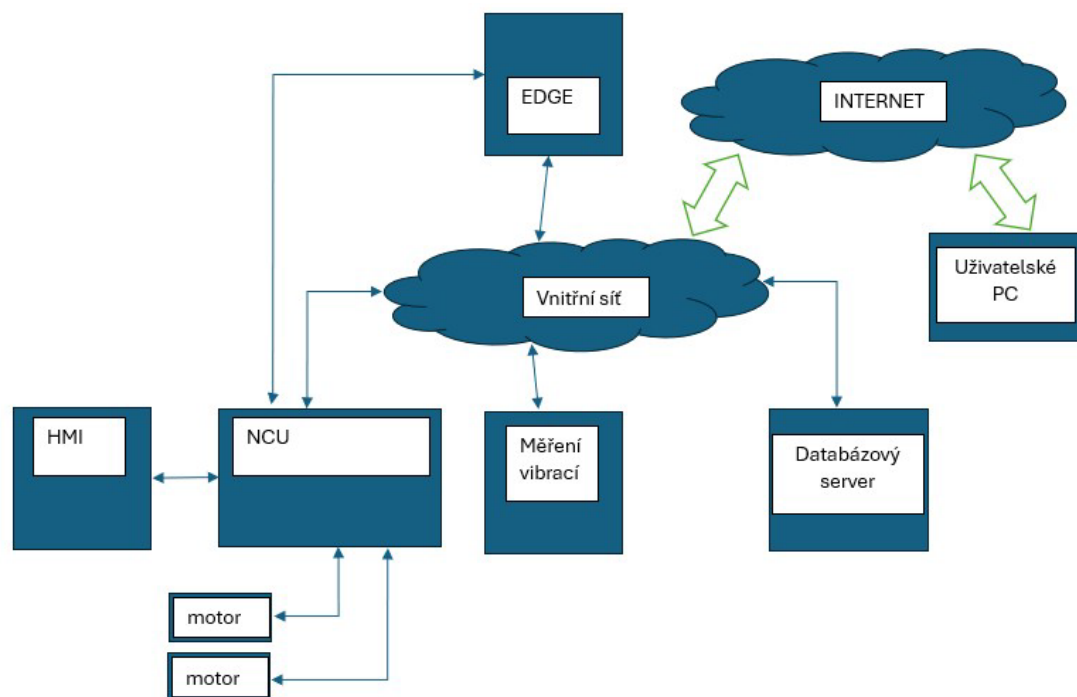
Dodané zařízení Simatic Edge:



Obr. 8 Nový Simatic Edge.

#### 4.2.2 Schéma zapojení Funkčního vzorku

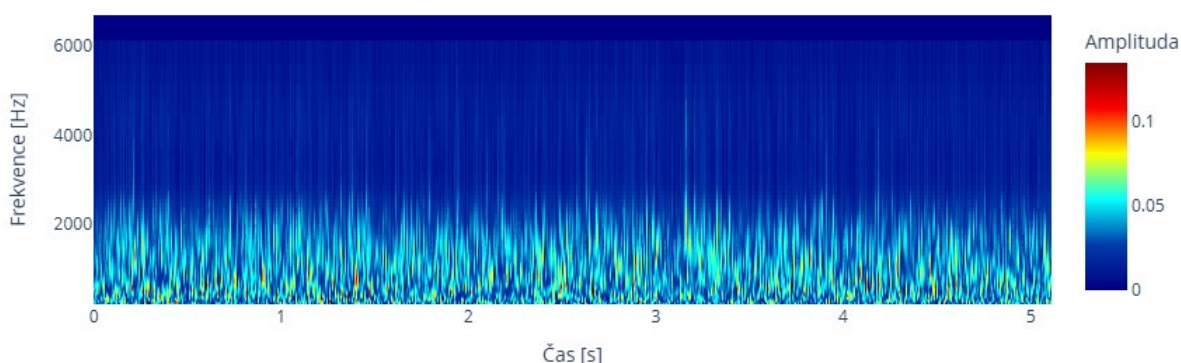
Schéma zapojení funkčního vzorku do vnitřní sítě TAJMAC-ZPS s následným sdílením dat přes veřejnou síť je zobrazen na Obr. 9.



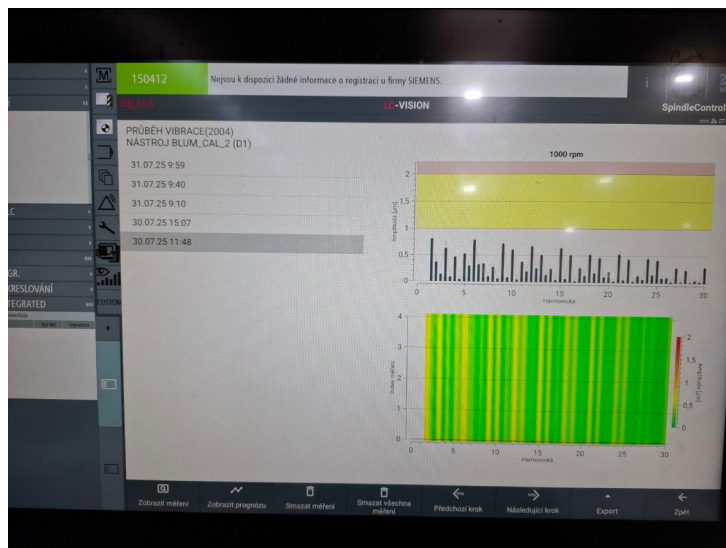
Obr. 9 Schéma zapojení Funkčního vzorku ProEdgeTAJMAC do vnitřní a veřejné sítě.

Informace zobrazované na webovém rozhraní jsou například, aktuální teploty na vybraných místech, sledování zatížení stroje v rámci sledovaného dne a hodnoty z realizovaných selftestů (Obr. 11). Ukázka analýzy vibrací, kde je provedena spojitá vlnková transformace, která rozkládá signál na časově-frekvenční složky. To umožňuje analyzovat lokální charakteristiky a detekovat jejich umístění a trvání. Rozdíl mezi FFT a CWT je v poskytování přesnější časově-frekvenčního popisu. Ukázka analýzou CWT v ose X je znázorněno na Obr. 10.

osa X - CWT – Continuous Wavelet Transform (Morlet)

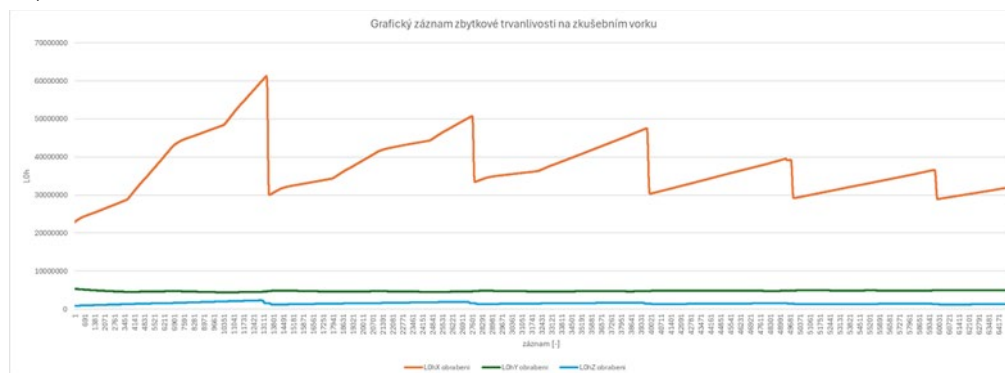


Obr. 10 Analýza CWT posuvové osy X



Obr. 11 Ukázka analýzy dat z vřetene stroje MCG.

Dále je možné sledovat po exportu dat průběh zbytkové trvanlivosti jednotlivých komponent (Obr. 12)

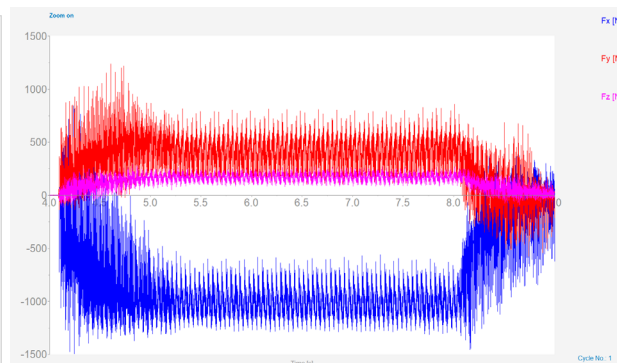
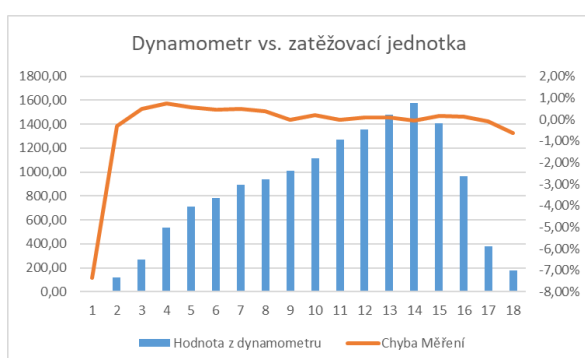


Obr. 12 Grafický záznam Loh na zkušebním vzorku

#### 4.2.3 Ukázky ze zkoušek

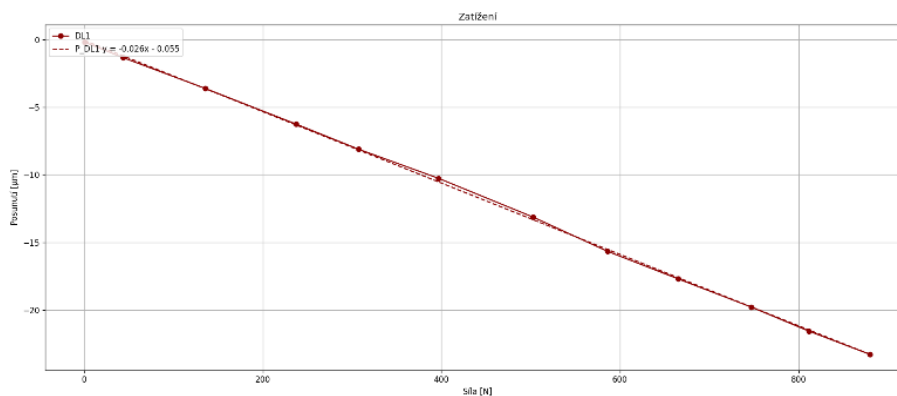
V rámci zkoušek dílčích částí funkčního vzorku a funkčního vzorku jako celku byla realizována celá řada zkoušek založená na statických i dynamických měřeních s možností verifikace.

Na Obr. 13 je znázorněna ukázka měření, vyhodnocení a verifikace sil pod statickým a dynamickým zatížením u stroje MCV.



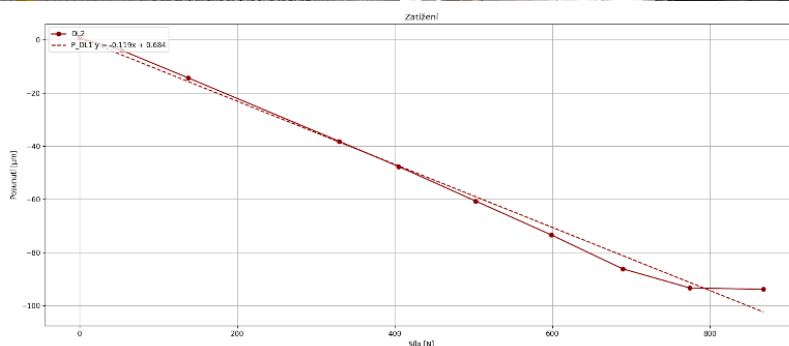
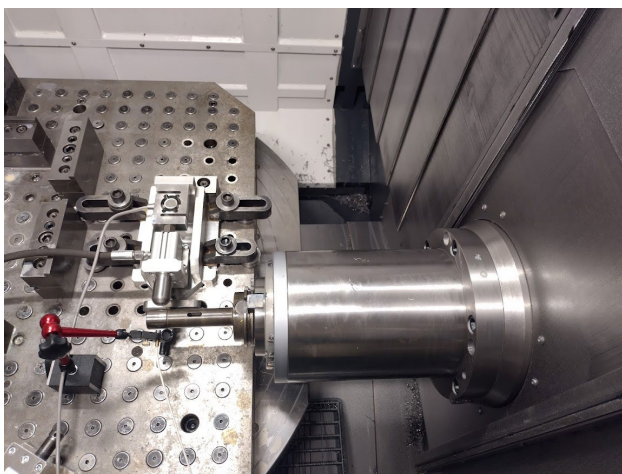
Obr. 13 Měření sil od obrábění získaných z řídicího systému stroje a externího dynamometru.

Na Chyba! Nenalezen zdroj odkazů. je znázorněna ukázka z měření statické tuhosti stroje MCG1000.



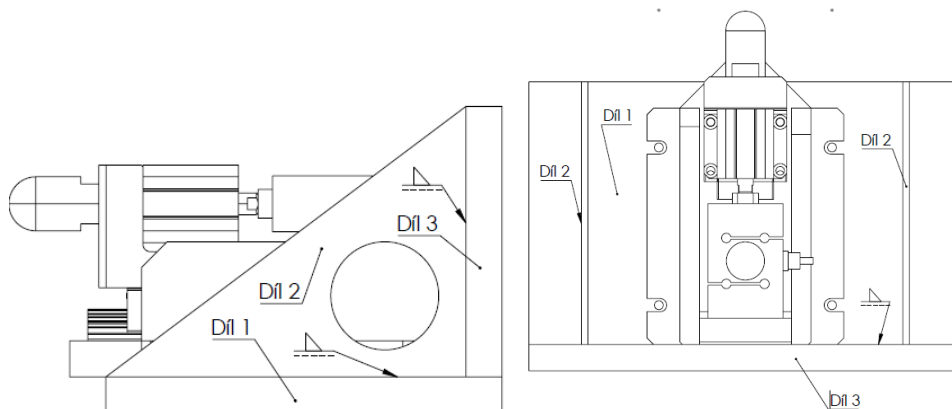
Obr. 14 Měření statické tuhosti stroje pro verifikaci FMU modelů stroje MCG1000.

Na Obr. 15 je znázorněna ukázka z měření statické tuhosti stroje MCG1000.



Obr. 15 Měření statické tuhosti stroje pro verifikaci FEM modelů stroje MCH1000.

Z důvodu vyšší poddajnosti upínacího přípravku byl navržen a vyroben nový přípravek pro verifikační měření na stroji MCH. Schéma upraveného přípravku je zobrazeno na Obr. 16.



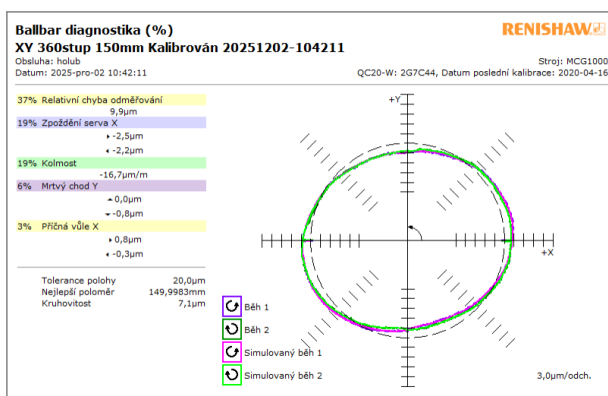
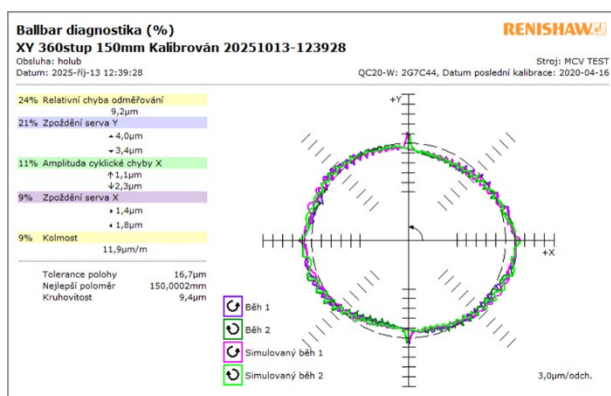
Obr. 16 Upravená konstrukce měřicího přípravku.

Zkoušky kruhové interpolace byly opakovaně prováděny za účelem verifikace dynamického měření. Na Obr. 17 jsou ukázky z verifikačních měření na stroji MCV – vlevo a MCG – vpravo.



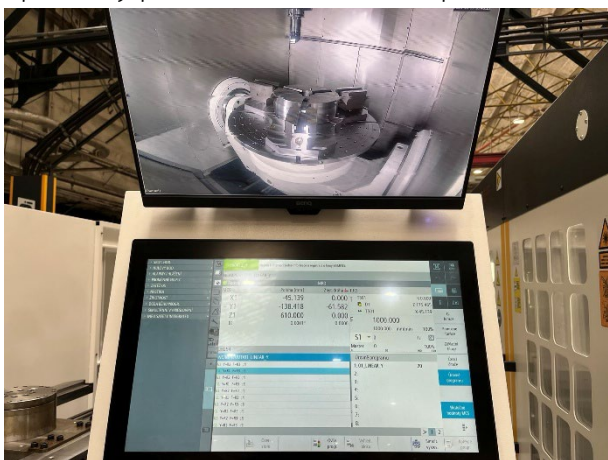
Obr. 17 Zkoušky kruhové interpolace na stroji MCG1000.

Na Obr. 18 jsou zobrazeny výsledky z měření zkouškou kruhové interpolace pro stroj MCV – vlevo a MCG – vpravo.



Obr. 18 Ukázka zkoušky kruhové interpolace na stroji MCV-vlevo a MCG - vpravo.

Na Obr. 19 jsou ukázky z testování programů pro dynamické měření – vlevo a přípravy měřicí aparatury pro statické měření – vpravo.



Obr. 19 Dynamické zkoušky – vlevo, příprava měřicí aparatury – vpravo na stroji MCG1000.