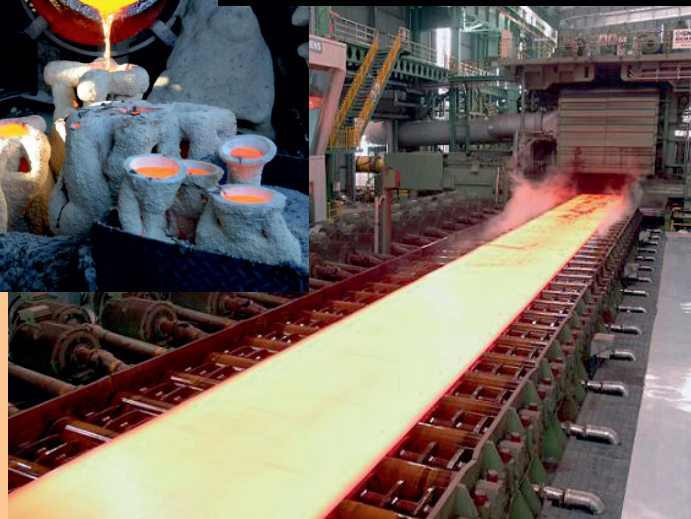
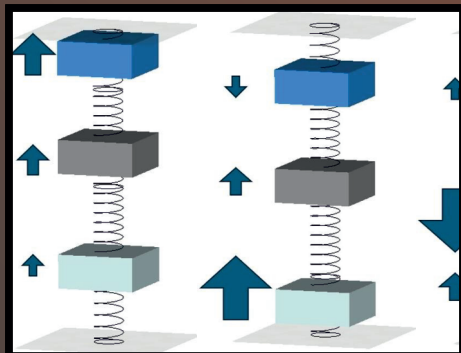
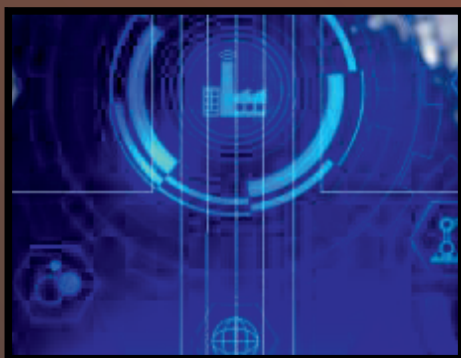
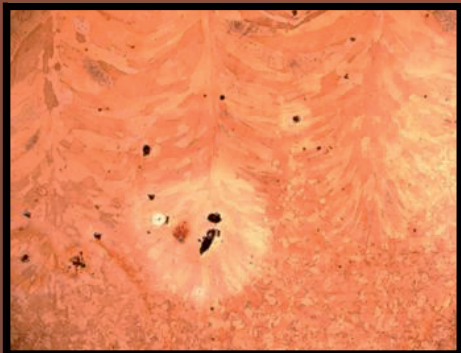




ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE  
Strojnícka  
fakulta

# TECHNOLÓG



Ročník 17  
november 2025

4/2025

# TECHNOLÓG

*Vychádza spravidla dvakrát ročne. Publikuje vedecké, výskumné, odborné, teoretické práce, návody, štúdie, recenzie, informácie o spracovaní technických materiálov. Zameriava sa na uverejňovanie príspevkov a prác venujúcich sa otázkam z oblasti trieskových a beztrieskových technológií, fyzikálnych princípov nekonvenčných technológií, technologickosti konštrukcií nástrojov, ekonomike výrobného procesu, ekologizácii, spracovaniu odpadov. Takisto publikuje práce o strojoch, nástrojoch, prípravkoch a meracej technike pre oblasť mechanických technológií, výsledkoch výskumu vo sfére informačných technológií v technologickej oblasti. Uverejňuje práce o histórii a vývine mechanických technológií.*

*Časopis zverejňuje príspevky v jazykoch: slovenskom, českom, poľskom, ruskom, anglickom a nemeckom.*

Všetky príspevky sú recenzované dvoma nezávislými recenzentmi a redakcia si vyhradzuje právo na ich redakčnú úpravu. Nepreberá sa zodpovednosť za prípadné škody spôsobené použitím úkonov, metód, produktov, ideí, návodov a pod. publikovaných autormi príspevkov.

**Evidenčné číslo MK SR-2800/08, EV 10/22/EPP**

**ISSN 1337-8996, Online ISSN 2730-0501**

**Adresa redakcie:**

**Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta, Univerzitná 1, 010 26 Žilina**

**Telefón: 041-513 2764**

**e-mail: [jan.moravec@fstroj.uniza.sk](mailto:jan.moravec@fstroj.uniza.sk)**

**Vydáva Žilinská univerzita v Žiline v EDIS-vydavateľstve UNIZA**

**Univerzitná HB, 010 26 Žilina, IČO 00 397 563**

**šéfredaktor - editor in chief:**

doc. Ing. Ján MORAVEC, PhD.

**výkonný redaktor - executive editor:**

doc. Ing. Ján Dižo, PhD.

**redaktor - redactor:**

Ing. Elena Kantoríková, PhD.

**vedecký redaktor - scientific editor:**

prof. Ing. Jozef PILC, CSc.

**redakčná rada - editorial board:**

doc. Ing. Silvia MALÁKOVÁ, PhD. (SK)

doc. Ing. Ján MORAVEC, PhD.

(SK)

doc. Ing. Petr KAWULOK, PhD. (CZ)

prof. Ing. Jozef PILC, CSc.

(SK)

Ing. Vladimíra BIŇASOVÁ, PhD. (SK)

prof. Ing. Alyona LOVSKA, Dr.Sc. Tech.

(UA)

doc. Ing. Jozef BÍLIK, PhD. (SK)

prof. Ing. Eva TILLOVÁ, PhD.

(SK)

doc. Dr. - Inž. Janusz MUSIAL (PL)

prof. Ing. Peter DEMEČ, CSc.

(SK)

Dipl. Ing. Eva REGER (D)

prof. Ing. Jan SUCHÁNEK, CSc.

(CZ)

doc. Ing. Ludmila DULEBOVÁ, PhD. (SK)

prof. Dr. Ing. Milan SÁGA

(SK)

prof. Ing. Georgi KODZHASPIROV, DrSc. (RU)

prof. Dr. Ing. Miroslav NESLUŠAN

(SK)

doc. Ing. Ján DIŽO, PhD. (SK)

prof. Ing. Danka BOLIBRUCHOVÁ, PhD.

(SK)

doc. Mgr. Branislav FTOREK, PhD. (SK)

prof. Ing. Emil EVIN, CSc.

(SK)

prof. Ing. Alžbeta SAPIETOVÁ, PhD.

(SK)

## OBSAH

<b>ZOZNAM RECENZENTOV</b>	<b>4</b>
<b>RHETICUS</b>	<b>5</b>
<b>ŠTÚDIA LASEROVÉHO ZVÁRANIA MEDENÝCH ZLIATIN S DÔRAZOM NA KVALITU SPOJA</b> <i>Elena Kantoríková</i>	<b>9</b>
<b>PRÍDAVKY PRE ZÁPUSŤKOVÉ VÝKOVKY</b> <i>Borislav Melo</i>	<b>13</b>
<b>MODERNIZATION OF COMPANY TO DIGITAL PROCESSES BY IMPLEMENTING A NEW DATA APPROACH FOR INDUSTRIAL OPERATIONS</b> <i>Vladimíra Biňasová, Branislav Mičieta, Marta Kasajová, Ján Zuzik</i>	<b>16</b>
<b>ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGY</b> <i>Ivana Domaniková, Miroslav Blatnický, Ján Dižo, Patrik Slušňák</i>	<b>20</b>
<b>VYUŽITIA UMELEJ INTELIGENCIE PRE TVORBU ANALÝZY FMEA</b> <i>Peter Bubeník, Miroslav Rakyta, Martin Buzalka, Vladimíra Biňasová</i>	<b>24</b>
<b>NÁVRH KOMPAKTNEJ DOSKY PLOŠNÝCH SPOJOV PRE PRESNÉ SNÍMANIE ANALÓGOVÉHO VSTUPU</b> <i>Martin Bučko, Vladimír Samaš, Patrik Slušňák</i>	<b>29</b>
<b>OVERVIEW OF EMERGING TECHNOLOGIES ADVANCING INDUSTRY 4.0</b> <i>Vladimíra Biňasová, Branislav Mičieta, Martin Gašo, Beáta Furmannová</i>	<b>33</b>
<b>EIGENANALYSIS OF A VALVETRAIN SIMPLIFIED MODEL OF A COMBUSTION ENGINE WITH 3DOF</b> <i>Ján Dižo, Miroslav Blatnický, Tadeusz Dziubak</i>	<b>37</b>
<b>POROVNANIE OPTIMALIZAČNÝCH ALGORITMOV PRI SPEKTRÁLNOM LADENÍ MECHANICKEJ SÚSTAVY</b> <i>Jaroslav Majko, Lucia Deganová, Ondrej Piroh, Ján Minárik</i>	<b>43</b>

## ZOZNAM RECENZENTOV PRÍSPEVKOV

doc. Ing. **Jozef BÍLIK**, PhD.  
prof. Ing. **Lubomír HUJO**, PhD.  
doc. Ing. **Róbert LABUDA**, PhD.  
Ing. **Pavol LUKÁŠIK**, PhD.  
prof. Ing. **Augustín SLÁDEK**, PhD.  
prof. Ing. **Peter ZVOLENSKÝ**, CSc.

*Príspevky boli recenzované dvomi nezávislými recenzentami, ktorí nie sú autormi ani spoluautormi príspevkov, nie sú z rovnakého pracoviska ako ktorýkoľvek z autorov, tak isto nie sú členmi redakčnej rady a ani redakcie časopisu.*

*The articles were reviewed by two independent reviewers who are not authors or co-authors of the articles, are not from the same workplace as any of the authors and are also not members of the editorial board of the journal.*

*Die Arbeiten wurden von zwei unabhängigen Gutachtern geprüft, die weder Autoren noch Mitautoren der Arbeiten sind, nicht aus demselben Fachbereich wie die Autoren stammen und keine Mitglieder der Redaktion oder des Redaktionsausschusses der Zeitschrift sind.*



### Georg Joachim de Porris RHETICUS

(\*16. február 1514, *Feldkirchen* –  
†4. december 1574, *Košice*)

Známe dielo *Mikuláša Kopernika* vyšlo v 16. storočí. Ešte pred vydaním *De Revolutionibus* v roku 1543 viacerí učitelia poznali *Kopernikovo* učenie. Podiel na vydaní jeho diela mal i mladý profesor matematiky vo *Wittenbergu*- *Georg Joachim von Lauchen*, zvaný aj *Rheticus*, ktorý zomrel v *Košiciach*.

*Rheticus* bol súčasníkom *Michaela Mästlina*, ktorý bol neskôr profesorom a priateľom *Johana Keplera*. *Mästlin* a *Rheticus* veľmi podporovali *Kopernikovo* nové učenie. Aj z toho dôvodu sa *Rheticus* rozhodol navštíviť v roku 1539 *Kopernika*, ktorý býval v meste *Frombork (Frauenburg)*. Nielen katolícka cirkev, ale aj *Luther* a *Melanchton*, ako zástancovia evanjelickej cirkvi sa stali odporcami *Kopernikovo* učenia. *Rheticus* u *Kopernika* zostal namiesto plánovaných dvoch týždňov dva roky. Vydal v roku 1540 ešte pred vydaním *De Revolutionibus* spis, v ktorom informuje o *Kopernikovom* revolučnom učení a rozoberá i jeho spôsob skúmania.

*Georg Joachim de Porris*, tiež známy ako *Rheticus*, bol matematik, astronóm, kartograf, výrobca navigačných prístrojov, praktický lekár a učiteľ. Možno je najznámejší pre svoje trigonometrické tabuľky a ako jediný žiak *Mikuláša Kopernika*. Sprostredkoval vydanie diela svojho priateľa *De revolutionibus orbium coelestium (O pohybe nebeských sfér)*.

*Rheticus* sa narodil vo *Feldkirchu* v *rakúskom* arcivojvodstve. Rodičia *Georg Iserin* a *Thomasina de Porris* boli *talianskeho* pôvodu a vlastnili značné bohatstvo. Otec bol mestským lekárom a vládny úradníkom a vzdelával ho do veku 14 rokov, keď *Georg (Iserin)* okradol mnohých svojich pacientov a ukradol im z domovov veci a peniaze. V roku 1528 bol za svoje zločiny odsúdený a popravený a v dôsledku toho bolo jeho rodine odobraté priezvisko.

Rodina prijala rodné meno matky: *de Porris*. Neskôr ako študent na univerzite vo *Wittenbergu* *Georg Joachim* prijal toponymum *Rheticus*, teda formu latinského názvu pre svoj rodný región *Rhaetia*, bývalú rímsku provinciu. V imatrikulačnej listine univerzity v *Lipsku* je zapísaný ako *von Lauchen*. Po poprave *Georga Iserina* prevzal jeho lekársku prax *Achilles Gasser*, ktorý pomáhal *Rhaeticovi* pokračovať v štúdiu a podporoval ho. Takisto mu poskytol odporúčajúci list *Philippovi Melanchtonovi*, teológovi, a pedagógovi, ktorý sa stal jeho hlavným mecenášom. *Philipp Melanchthon*, „pravá ruka *Martina Luthera*“, bol teológ a pedagóg, ktorý reorganizoval celý vzdelávací systém *Nemecka*, založil a zreformoval niekoľko jeho univerzít. *Melanchthon* zohral významnú úlohu pri získavaní vymenovania *Rheticusa* za vyučovanie matematiky a astronómie na univerzite vo *Wittenbergu* v roku 1536. Toto vymenovanie, ktoré zahŕňalo vyučovanie aritmetiky a geometrie, dalo *Rheticusovi* plat 100 zlatých.

*Melanchthon* povolil *Rheticovi* dvojročnú dovolenku na štúdium s významnými astronómami. V októbri 1538 opustil *Wittenberg* a najprv odišiel do *Norimbergu*, kde navštívil profesorov matematiky. Tu sa zoznámil s tlačiarom a vydavateľom *J. Petreiusom*. Počas svojej cesty v *Norimbergu* sa *Rheticus* do počul o *Kopernikovi* a rozhodol sa ho vyhľadať.

V máji 1539 prišiel *Rheticus* do *Frauenburgu (Frombork)*, kde strávil dva roky s *Kopernikom* *Kopernik* ešte nedokončil rukopis svojej práce, zrejme sa rozhodol neusilovať o publicitu, pravdepodobne kvôli problému,

ktoré zosúladiť tieto zistenia s historicky zaužívanými náboženskými postojmi v tom čase. *Kopernik* umožnil *Rheticusovi* napísať abstrakt o svojom výskume napriek tomu, že si bol dobre vedomý kritiky a kontroverzie, ktorú by to mohlo priniesť. Až po tomto dal *Rheticusovi* ďalšie povolenie na úpravu a publikovanie jeho diela v plnom rozsahu. Len vďaka tomuto ich stretnutiu sa nakoniec dostala na svetlo sveta heliocentrická teória, koncept, ktorý by aj tak nebol akceptovaný v nasledujúcich desaťročiach.

*Rheticus* napísal:

*Počul som o sláve majstra Mikuláša Kopernika v severných krajinách. A hoci ma univerzita vo Wittenbergu urobila verejným profesorom v týchto umeniach, nemyslel som si, že by som mal byť spokojný, kým som sa prostredníctvom výučby nenaučil sa niečo viac. A tiež hovorím, že neľutujem ani finančné výdavky, ani dlhú cestu, ani zvyšné útrapy. Napriek tomu sa mi zdá, že za tieto problémy prišla veľká odmena, totiž, že ja, dosť odvážny mladý muž, som prinútil tohto ctihodného muža, aby sa o svoje myšlienky v tejto disciplíne podelil s celým svetom.*

V septembri 1539 odišiel *Rheticus* do *Danzigu (Gdańsk)*, aby navštívil starostu, ktorý mu poskytol finančnú pomoc na vydanie jeho *Narratio Prima (Prvá správa)* pripravovaného *Kopernikovho* pojednania. V *Danzigu* vyšlo *Narratio Prima* v roku 1540. Neočakávane obsahuje aj chválospev na *Prusko*. Rozoberá sa v nej pôvod, flóra a fauna krajiny, ako aj opisy niekoľkých jej miest, pokiaľ ide o ich obchod a históriu, čo dokazuje, že jeho cesty často slúžili dvojitému účelu. V auguste 1541 predstavil *Rheticus* kópiu *Chorographia* (obsahuje systematický prístup k príprave máp) a *Tabulu chorographica auff Preussen und etliche umbliegende lender (Mapa Pruska a susedných krajín)* *Albertovi, pruskému vojvodovi*. Vďaka tejto láskavosti od neho získal odporúčanie na to, aby mohol vydať *De revolutionibus*. Vojvoda požiadal *Rheticusa*, aby ukončil svoje cesty a vrátil sa na svoje učiteľské miesto. *Rheticus* sa vrátil na univerzitu vo *Wittenbergu* v októbri 1541. Bol zvolený za dekana filozofickej fakulty a zároveň nastúpil na teologickú fakultu. V máji 1542 odcestoval do *Norimbergu*, aby dohliadal na tlač prvého vydania knihy *De revolutionibus* u *Johannesa Petreia*, do ktorej zahrnul tabuľky goniometrických funkcií, ktoré vypočítal na ďalšiu podporu *Kopernikovho* diela. *Kopernik* zveril hotový rukopis *Rheticusovi*, ktorý ho odovzdal vydavateľovi v *Norimbergu*. Samotná tlač bola vykonaná veľmi dobre. Prvé vydanie z roku 1543 bolo vytlačené v *Norimbergu* u *Johana Petreia* s názvom *Nicolai Coprnicci Torinensis De revolutionibus orbium coelestium libri VI*.

*Rheticus* zostal v *Lipsku* až do roku 1545, kedy mu opäť zariadil dovolenku, aby mohol študovať v zahraničí. Po počiatočnom návrate do rodného mesta *Feldkirch* strávil nejaký čas v *Taliansku*, kde navštívil kolegov v *Miláne*. *Rheticus* pokračoval vo svojich cestách. V *Lindau*, meste v *Bavorsku* sa jeho zdravie zlomilo a v prvej polovici roku 1547 mal vážne psychické problémy. Po zotavení vyučoval matematiku v *Kostnici* koncom roka 1547, potom študoval medicínu v *Zürichu* a vo februári 1548 vrátil do *Lipska*. S *Melanchtonovým* vplyvom sa *Rheticus* stal členom teologickej fakulty v *Lipsku*.

*Rheticus*, ako muž mnohých talentov vydal kalendár a efemeridy z roku 1550 a takisto aj v roku 1551. Škandál ho však prinútil opustiť *Lipisko* v apríli 1551; bol obvinený z homosexuálneho pomeru s jedným zo svojich študentov. Musel utiecť a urobil to rýchlo, strávil nejaký čas v *Chemnitzi* a ďalšie obdobie v *Prahe*. Súdili ho v jeho neprítomnosti a jeho priatelia, ako napríklad *Melanchthon*, ho prestali podporovať: pravdepodobne nemali veľa možností, ak by si mali udržať svoje vlastné pozície. V neprítomnosti bol *Rheticus* odsúdený na 101 rokov vyhnanstva.

V rokoch 1551 - 1552 študoval medicínu na *pražskej* univerzite, ale jeho záujem o medicínu sa bol využívaný len na liečenie pacientov a nikdy sa nevenoval vedeckému výskumu. Jeho práca nepriniesla inovácie v medicíne tak, ako to bolo v matematike. V roku 1553 mu bolo ponúknuté miesto profesora matematiky vo *Viedni*, kde aj odišiel, ale nenastúpil na ponúknuté miesto. V roku 1554 sa presťahoval do *Krakova*, kde pôsobil 20 rokov ako praktický lekár.

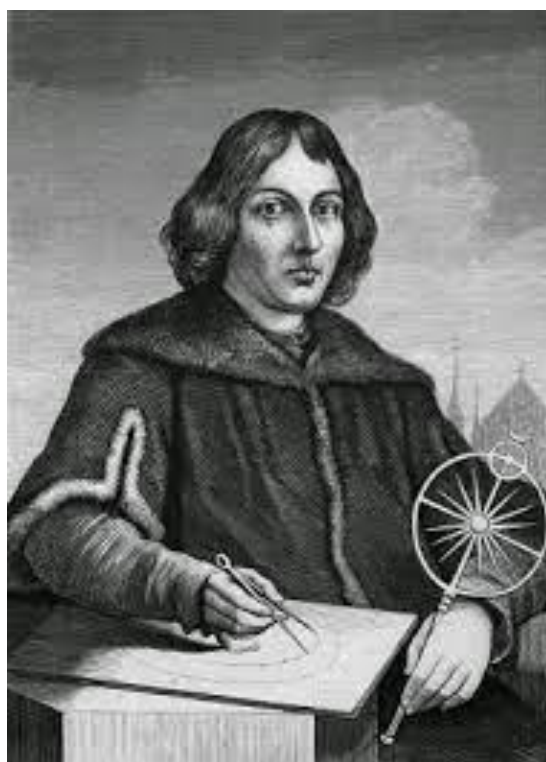
Svojho matematického záujmu sa v *Krakove* nevzdal a pracoval na svojich slávnych trigonometrických tabuľkách, ako aj na výrobe prístrojov, vykonávaní astronomických pozorovaní a alchymistických experimentov. V tejto fáze sa mu darilo celkom dobre, keď zamestnával šiestich výskumných asistentov a bol financovaný cisárom *Maximiliánom II.* za jeho prácu na trigonometrických tabuľkách. *Rheticova* dôležitá práca o trigonometrii *Opus Palatinum de triangulis* využíva všetkých šesť goniometrických funkcií. Uviedol tabuľky všetkých týchto šiestich funkcií v diele, ktoré dokončil a publikoval v roku 1596 *Valentine Otho* mnoho rokov po *Rheticusovej* smrti. *Valentinus Otho* dohliadal na ručný výpočet približne 100 000 pomerov s presnosťou na desať desiatinných miest. Po dokončení v roku 1596 zaplnil zväzok *Opus palatinum de triangulis* takmer 1500 strán. Jeho tabuľky boli dostatočne presné na to, aby sa dali použiť v astronomických výpočtoch až do začiatku dvadsiateho storočia.

Ďalšie *Rheticusove* diela zahŕňajú tvorbu mapy *Pruska* a práce o navigačných prístrojoch. Navrhol mnoho nástrojov, ako sú námorné kompasy a nástroj na zobrazenie dĺžky dňa počas roka.

Ako, kedy a prečo sa dostal *Rheticus* do *Košíc* nie je celkom známe. *Levočský* farár *Joachim Leibitzer* zaznamenal, že lekár a matematik *Georg Joachim Rheticus* zomrel 4.12.1574 v *Košiciach* na katar. Výskumy historika *Matúša Kučeru* vniesli trochu svetla do pobytu *Rhetica* v *Košiciach*. Je známe, že tu žil so svojim žiakom *Valentínom Othom*, ktorému daroval i vzácny *Kopernikov* rukopis. *Otho* po smrti *Rhetica* z *Košíc* odišiel a rukopis sa dostal do rúk *M. J. Christmanna*, dekana artistickej fakulty v *Heidelbergu*. Po smrti *Christmanna* prešiel do rúk *J. A. Komenského* a z jeho pozostalosti do knižnice grófa *Nostica* v *Čechách*. Napokon vláda ČSSR darovala cenný rukopis *Pol'skej ľudovej republiky* v roku 1956.



Obr. 1. Titulná strana *Canon Doctrinae Triangulorum*



Obr. 2. *Rheticus* zobrazený ako astronóm a matematik



### **Rheticove diela:**

*De libris revolutionum coelestium N. Copernici narratio prima Gdansk, 1540.*

*Orationes de astronomia, geographia et physica, Norimberk, 1542.*

*Ephemeris ex fundamentis Copernici, Leipzig, 1550.*

*Canon doctrinae triangulorum, Basel, 1580.*

*posmrtné: Thesaurus mathematicus, Frankfurt, 1613.*

*Die Chorographie des Joach. Rheticus, Dresden, 1876.*

### **LITERATÚRA**

- [1] WAGNER, C. (1774): *Analecta Sepusii sacri et profani II*. Viena.
- [2] KUČERA, M. (1973-1976): *Mikuláš Kopernik - osobnosť humanizmu a renesancie*. Zborník FF UK, Historica 24-25, s. 3-37.
- [3] TIBENSKÝ, J. (1979): *Dejiny vedy a techniky na Slovensku*. Martin, s. 53-54.
- [4] KUZMÍK, J. (1987): *Doplňky a opravy k slovníkom starovekých, stredovekých a humanisticko-renesančných autorov, prameňov a knižných skriptorov so slovenskými vzťahmi*. Matica slovenská, Martin, s. 107
- [5] KOPERNIK, M. (1974): *Obehy nebeských sfér*. VEDA Bratislava, s. 12-14, 495. Prekladatelia: Z. Horský, M. Kušík, J. Sopko, A. Valentovič, D. Vaculíková.
- [6] DANIELSON, D. (2006): *The first Copernicus: Georg Joachim Rheticus and the Rise of the Copernican Revolution*. Walker & Company, New York, ISBN 0-8027-1530-3
- [7] BURMEISTER, H. (1967): *Georg Joachim Rheticus 1514-1574*. Guido Pressler Verlag, Wiesbaden (v nemčine)
- [8] DESCHAUER, S. (1536): *Die Arithmetik-Vorlesung des Georg Joachim Rheticus*. Wittenberg: eine kommentierte Edition der Handschrift X-278 (8) der Estnischen Akademischen
- [9] ROSEN (1950): *Rheticus, George Joachim*. Dictionary of Scientific Biography, CC Gillispie, ed., Vol. XI (New York: Charles Scribner's Sons,): s. 395-398.
- [10] DRUGA, L. (2006): *Dejiny astronómie a Slovensko*. Bratislava, ISBN 978-80-85221-534.

# Štúdia laserového zvarovania medených zliatin s dôrazom na kvalitu spoja

**Elena Kantoríková, Ing., PhD.**

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: elena.kantorikova@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2763

## Study of laser welding of copper alloys with emphasis on joint quality

**Abstract:** The article deals with the issue of laser welding of copper alloys and the analysis of the properties of the welded joint. The study compared selected technological parameters of the process, the procedure for creating the welded joint, and evaluated the technological properties of the welded material. The aim of the work is to contribute to a more effective setting of laser welding parameters and to improve the quality of the resulting welds of copper alloys.

**Keywords:** laser welding, mechanical properties, copper alloys.

## ÚVOD

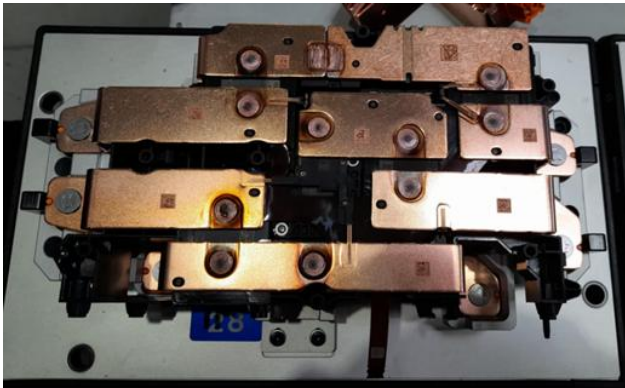
Laserové zvarovanie patrí medzi moderné a dynamicky sa rozvíjajúce technológie spájania kovových materiálov. Oproti tradičným zvaracím postupom prináša vyššiu presnosť, rýchlosť a jednoduchšiu integráciu do automatizovaných výrobných procesov [1]. Práve tieto vlastnosti umožnili jeho široké využitie v automobilovom, leteckom či elektrotechnickom priemysle, ako aj v ďalších technických oblastiach. Význam tejto metódy narastá najmä pri spracovaní materiálov so zhoršenou zvarateľnosťou, napríklad medených zliatin, ktoré sa vyznačujú vysokou tepelnou vodivosťou a nízkou schopnosťou pohlcovať laserové žiarenie. Pre dosiahnutie kvalitného zvarového spoja je potrebné presne nastaviť a kontrolovať technologické parametre procesu, medzi ktoré patrí výkon lasera, rýchlosť posuvu, poloha zaostrenia lúča, typ ochranného plynu a ďalšie faktory. Tieto parametre majú zásadný vplyv na kvalitu zvaru, jeho mikroštruktúru i mechanické vlastnosti [1, 2]. V aplikáciách, kde je rozhodujúca pevnosť a spoľahlivosť spoja, je preto optimalizácia procesných parametrov mimoriadne dôležitá. Laserové zvarovanie je moderná technológia, ktorá sa rýchlo rozvíja a má obrovský potenciál do budúcnosti, je technológiou, ktorá prináša mnoho výhod, ale zároveň si vyžaduje ďalšie inovácie a zlepšenia. Má veľký potenciál ovplyvniť budúcnosť výroby, a to najmä v oblastiach, kde je dôležitá presnosť a efektívnosť [2, 3]. Táto technológia je vhodná pre rôzne druhy materiálov a v porovnaní s tradičnými metódami je rýchlejšia, presnejšia a nákladovo efektívna, čo umožňuje

výrobu vo veľkom množstve. Známých je niekoľko rôznych typov laserového zvarovania.

## 1 LASEROVÉ ZVÁRANIE MEDI

*Med'* sa používa v širokej škále aplikácií, pretože je tvárna, výborný vodič elektrického prúdu aj tepla, takisto silno odráža laserové svetlo, najmä infračervené lasery. Preto je potrebné veľké množstvo energie, aby sa dosiahlo spájanie medi. Avšak, keď sa jej teplota zvyšuje, zvyšuje sa aj jej schopnosť absorbovať teplo, a pri bode tavenia sa *med'* stáva vysoko absorpčnou, čím sa výrazne zvyšuje riziko vytrysknutia roztaveného materiálu. Vysoká tepelná vodivosť *medi* spôsobuje, že sa veľmi ľahko deformuje a poškodí pri nadmernom tepelnom pôsobení. Spôsoby, ako tomu zabrániť, zahŕňajú použitie laserov s kratšími vlnovými dĺžkami alebo určitými farbami (zelená), ako aj pomalé zvyšovanie intenzity laserového výkonu [4]. *Med'* má taviacu sa zónu s nízkou viskozitou (oveľa nižšiu ako *ocel'* alebo *hlinik*) a je náchylná na zvlnenie a pohyb. *Med'* tiež rýchlo tuhne, čo vedie k zvarovým spojom s nepravidelnou morfológiou v porovnaní s inými materiálmi, ako je *ocel'*, a zlému vyplneniu zvarovej medzery. Pri *medi* spôsobuje samotný laser vlny a prúdy v taviacej sa zóne, čo následne vyvoláva turbulencie v celej zóne. Dosiahnuť ideálne zvary je náročné a vyžaduje vysokú presnosť nastavenia správnych parametrov zvarovania. Zvarové spoje z *medi* sú zvyčajne mäkké v porovnaní so základným materiálom, pretože *med'* nie je alotropná, tak nedochádza k fázovým transformáciám [4, 5].

Zváranie *medi* nachádza široké uplatnenie v rôznych priemyselných odvetviach vďaka jej výnimočnej elektrickej a tepelnej vodivosti.



Obr. 1. Zvary na experimentálnej súčiastke

V elektrotechnickom priemysle sa *medené* zvárané konštrukcie často využívajú pri výrobe konektorov, prípojnic či častí generátorov. Zváranie *medi* má svoje miesto aj v automobilovom priemysle, najmä pri výrobe radiátorov a komponentov chladiacich systémov. Tieto príklady poukazujú na všestrannosť *medi* a efektívnosť zváracích technológií pri zabezpečení spoľahlivých a mechanicky pevných spojov.

## 2 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

Ako experimentálny materiál bola použitá valcovaná 99,9 % *med'* DIN 2.0060. Mechanické vlastnosti experimentálneho materiálu sú v tab. 1. Táto *med'* sa využíva v automobilovom priemysle, stavebných zariadeniach, spojovacích materiáloch, elektronike a elektrických zariadeniach. Sledovali sa dva typy zvarov: špirálový a obdĺžnikový.

Tab. 1. Mechanické vlastnosti

Stav materiálu	R220 (mäkký)	R240 (1/2 tvrdý)	R290 (3/4 tvrdý)
Hrúbka [mm]	0,1 ÷ 5	0,10 ÷ 10	0,10 ÷ 10
$R_m$ [MPa]	220 ÷ 260	240 ÷ 300	290 ÷ 360
$R_{p0,2}$ [MPa]	max. 140	min. 180	min. 250
Ťažnosť [%]	33 %	8 %	4 %

Cieľom práce je analyzovať parametre laserového zvárania pri dvoch rôznych zvaroch. Vyhovujúce parametre, teda zvary, ktoré prešli ťahovými skúškami a parametre, pri ktorých pevnosť zvarov nebola dostatočná. Dôležitý ukazovateľ je pevnosť a elektrická vodivosť zvaru.

Zváranie vykonávalo zariadenie *TruDisk* pre oba typy tvaru zvaru. Výkon jadra pri špirálovom zvare a pri obdĺžnikovom bol totožný, a to až 75 %. Rýchlosť

zvárania pri špirále bol na hranici 70 mm·s<sup>-1</sup> a pri obdĺžniku okolo 75 mm·s<sup>-1</sup>. Hĺbka prevarenia mala dosahovať hĺbku až okolo 3 mm. Tieto parametre sú uvedené v tab. 2. Pre porovnanie bol zvolený druhý parameter zvárania s výkonom 8000 W. Výkon jadra sa znížil pri špirálovom zvare na hranicu 60 % a pri obdĺžnikovom bol na úrovni 50%. Rýchlosť zvárania bola výrazne zvýšená, čo sa odzrkadlilo aj na vizuálnej stránke zvaru. Rýchlosť pri špirále dosahovala až 200 mm·s<sup>-1</sup> a pri obdĺžniku okolo 150 mm·s<sup>-1</sup>. Zvýšením rýchlosti sa hĺbka prevarenia znížila na 1 mm.

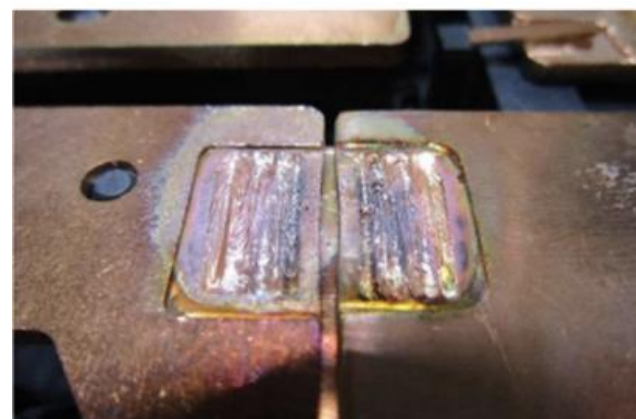
Tab. 2. Parametre zvárania

	1	2
Výkon lasera	6000 W	8000 W
Výkon jadra	75 %	60 %
Rýchlosť zvárania	70 mm·s <sup>-1</sup>	200 mm·s <sup>-1</sup>
Hĺbka prevarenia	cca 3 mm	cca 1 mm

Zvarové spoje je možné vidieť na obr. 2. a obr. 3. Laserové zváracie zariadenie bolo nastavené na programy v dvoch tvaroch - špirála a obdĺžnik.



Obr. 2. Špirálové zvarové spoje.



Obr. 3. Pozdĺžne zvarové spoje

Pri všetkých parametroch zvárania bola pracovná vzdialenosť medzi laserom a súčiastkou 345 mm. Ochranný plyn pri tejto technológii nebol použitý. Podmienka pevnosti zvarov bola, aby vydržali zaťaženie 5000 N. Je veľmi dôležité, aby materiál, ktorý sa má zvärať, bol čistý a bez povrchových uhlíkov a oxidov.

Pre dosiahnutie ideálneho zvarového spoja je potrebné venovať pozornosť tiež správne obrábaniu, čisteniu, montáži a každému zaobchádzaniu s materiálom. Treba sa hlavne vyhnúť obrábacím metódam, ktoré zanechávajú zbrúsený alebo pošpinený povrch. Napríklad pásová píla zanechá povrch nerovnomerný a nevhodný pre zváranie. Tento problém možno riešiť dodatočným obrábaním hrany spoja po reze. Brúsenie a pieskovanie sú taktiež technológie, ktorým sa treba vyhnúť. Keďže je *meď* veľmi mäkký materiál, tieto technológie môžu spôsobiť zarytie nečistôt a rôznych prvkov do materiálu. Ak sa brúseniu vyhnúť nedá, tak sa odporúča použiť hrubý kotúč. Pre odstránenie nečistôt a uhlíkových zvyškov na *medených* dieloch možno zvyčajne odstrániť pomocou *acetónu* alebo iných rozpúšťadiel. Rozpúšťadlá obsahujúce chlór sa neodporúčajú, pretože pri zahrievaní môžu vytvárať toxické plyny [4, 5]. Výber správneho laserového zariadenia na zváranie *medi* je taktiež kľúčové pre dosiahnutie kvalitného zvaru s požadovanými vlastnosťami. Každý typ laseru, v závislosti od jeho vlnovej dĺžky, režimu (kontinuálny alebo pulzný) a nastaviteľných parametrov, ovplyvňuje efektívnosť zvárania a hlavne výsledný zvar požadovaných vlastností a kvality. Lasery s vhodnou vlnovou dĺžkou dosahujú lepšie spojenie s *medou* a znižujú riziko defektov a praskania. Použitie kontinuálneho laseru pomáha predchádzať praskaniu spôsobenému cyklickým ohrevom a chladením, ktorý je charakteristický pre pulzný režim. Správny výber laseru tak priamo prispieva k dosiahnutiu stabilného, homogénneho a pevného zvaru, čo je v praxi pri zváraní *medi* obzvlášť dôležité [6]. A keďže je zváranie *medi* a jej zliatin podstatne náročné, je potrebné zvoliť čo najideálnejšie parametre zvárania, ktoré sú závislé od viacerých aspektov, ako je napríklad zloženie zliatiny, hrúbka zváraného dielu alebo prostredie, v ktorom zváranie prebieha a mnoho ďalších faktorov.

### 3 HODNOTENIE

Špirálové zvarové spoje v rezoch mali viaceré nedostatky, ako je zvýšená pórovitosť a viacero studených spojov. Výsledky trhacích skúšok potvrdili, že tieto zvary neboli ani zďaleka dostatočne pevné a bolo nutné doladiť základné parametre laserového zvárania. Zvar pri prvom použití parametru narušoval vodivosť materiálu a pevnosť limitovala funkciu súčiastky. Obrázok 4 prezentuje

zvarové spoje po skúške ťahom, žltým krúžkom je označený nevyhovujúci zvar, zeleným je označený vyhovujúci.

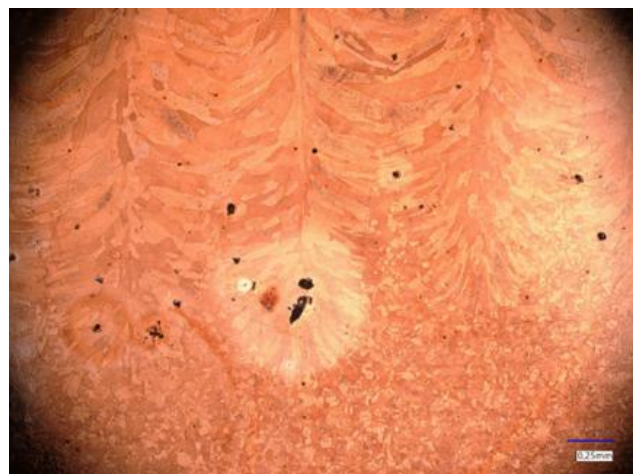


Obr. 4. Porovnanie zvarových spojov

Po viacerých neúspešných pokusoch pri zmene parametrov laserového zvárania sa pristúpilo aj ku väčšej zmene v programe. Hlavne pri špirálovom zvare nastali zásadné zmeny v tvare trajektórie laserového lúča a pribudlo viac špirál s cieľom získať pevnejší zvar. Zvar obdĺžnikového tvaru ostal takmer nezmenený.



Obr. 5. Mikroštruktúra zvarového spoja - špirálový tvar



Obr. 6. Mikroštruktúra zvarového spoja - obdĺžnikový tvar

Pri detailnej mikroštruktúrálnej analýze zvarového spoja bolo pozorovaných viacero pórov a drobných nepravidlostí, ktoré predstavujú vnútorné defekty

pravdepodobne vzniknuté v dôsledku nedostatočného odvádzania plynov počas procesu tuhnutia kovu. Napriek prítomnosti týchto chýb bola zistená dostatočná pevnosť zvaru. Mechanické vlastnosti boli overené meraním tvrdosti podľa *Vickersa*, pričom namerané hodnoty potvrdili homogénnu a uspokojivú tvrdosť v celom objeme spoja. Výsledky trhacích skúšok zároveň preukázali, že zvarené spoje vykazujú primeranú pevnosť pre požadované technické aplikácie. Zistená pórovitosť a lokálne defekty však môžu mať negatívny vplyv na elektrickú a tepelnú vodivosť materiálu, čo je potrebné zohľadniť pri hodnotení funkčných vlastností súčiastky. Zaujímavým javom je zväčšovanie hĺbky pretavenej oblasti smerom od stredu špirály. Tento jav možno vysvetliť akumuláciou tepla v materiáli počas zvárania - ako sa zvyšovala celková teplota v okolí zvarovej oblasti, dochádzalo k hlbšiemu pretaveniu základného materiálu. Tento efekt môže mať vplyv na tvar a rozmery tepelne ovplyvnenej oblasti (*TOO*) a môže byť výhodný z hľadiska postupného zlepšovania metalurgickej väzby.

Výsledky merania tvrdosti pre vzorku s obdĺžnikovým tvarom zvaru ukázali, že tvrdosť základného materiálu sa pohybovala v rozmedzí 65 ÷ 70 HV, zatiaľ čo tvrdosť samotného zvarového spoja dosahovala približne 55 HV. Z nameraných hodnôt vyplýva, že s približovaním sa k zvarovému spoju dochádzalo k postupnému poklesu tvrdosti. Naopak, smerom od spoja do oblasti základného materiálu sa hodnoty tvrdosti zvyšovali, až nadobudli takmer konštantnú úroveň. Pri vzorke so špirálovým tvarom zvaru boli zistené odlišné výsledky oproti prvej vzorke. Kým v prvom prípade boli spájané dva *medené* plechy, v tomto prípade išlo o spoj medzi *medeným* plechom a *medeným* valčekom. Tvrdosť plechu bola totožná s predchádzajúcou vzorkou, keďže išlo o rovnaký materiál. Tvrdosť valčeka sa pohybovala v rozmedzí 50 ÷ 55 HV, zatiaľ čo tvrdosť v oblasti zvaru dosahovala 55 ÷ 60 HV, čo naznačuje postupný pokles tvrdosti v rámci vzorky.

Rozdiely v hodnotách tvrdosti zváraných materiálov možno pripísať odlišnému typu tvárnenia. Plech bol valcovaný za studena, čím došlo k deformačnému spevneniu a zväčšeniu hustoty dislokácií v kryštálovej mriežke, čo viedlo k zvýšeniu tvrdosti. Naopak, valček bol vyrobený tvárnením zo žihanej tyče, ktorá vykazovala nižší stupeň deformačného spevnenia. Ďalším faktorom ovplyvňujúcim výsledky mohla byť rozdielna rýchlosť prehrievania a ochladzovania - hrubší valček sa zahrieval a chladil pomalšie ako tenký plech, čo predĺžilo pôsobenie teplôt v oblasti rekryštalizácie a viedlo k vzniku mäkšej štruktúry.

Priemerné hodnoty tvrdosti zistené skúškou podľa *Vickersa* potvrdili tieto závery. Pre špirálový zvar bola nameraná priemerná tvrdosť 57,96 HV, zatiaľ čo pre obdĺžnikový zvar 60,56 HV. Napriek určitým

rozdielom medzi vzorkami, dosiahnuté hodnoty tvrdosti potvrdili, že tvrdosť zvarových oblastí bola postačujúca a súčiastka spĺňa požiadavky na jej funkciu. Tvrdosti v oblasti zvarov aj základných materiálov svedčia o vhodnosti zvolených zvaracích parametroch, technológií a materiálov navrhnutých pre dané aplikácie.

## ZÁVER

V práci boli analyzované dva typy laserových zvarov. Optimalizáciou parametrov zvárania sa podarilo dosiahnuť požadovanú pevnosť nad 5000 N pri výkone lasera 8000 W, výkone jadra 40 % a rýchlosti zvárania 150 ÷ 180 mm·s<sup>-1</sup>. Hĺbka prevarenia dosiahla približne 1 mm pri oboch zvaroch. Napriek výskytu menších pórov a vnútorných chýb bola celková pevnosť zvarov vyhovujúca. Tvrdosť sa pohybovala v rozmedzí 50 ÷ 60 HV v závislosti od tvaru spoja. Výsledky potvrdili, že oba typy zvarov sú technologicky realizovateľné a spĺňajú požiadavky pre priemyselné využitie, čím sa prispelo k optimalizácii procesu laserového zvárania medených súčiastok.

## Pod'akovanie

*Táto práca bola podporená projektom KEGA 003ŽU-4/2024 Vedeckou grantovou agentúrou Ministerstva školstva Slovenskej republiky.*

## LITERATÚRA

- [1] ORSZÁGH, V. (1975): *Zváranie medi a medených zliatin*. 2. vyd. Knihnica Výskumného ústavu zvaračského v Bratislave. Bratislava: Alfa.
- [2] LASER WELDING TECHNOLOGY (2023): *Evolution history & Future Trend*. [Online] <https://www.megmeet-welding.com/en/news/Evolution-ofLaser-Welding-Technology>
- [3] EDMUND OPTICS. (2025): *Key Parameters of a Laser System*. Barrington (USA): Edmund Optics, [Online], <https://www.edmundoptics.com/knowledgecenter/application-notes/lasers/key-parameters-of-a-laser-system/>
- [4] BAISON (2024): *7 types of laser welding you need to know*. [Online], <https://baisonlaser.com/blog/types-of-laser-welding/>
- [5] DAVIS, J. R. (2001): *Copper and copper alloys*. Materials Park, OH: ASM International, VII, 652 s. ISBN 978-0-87170-726-0.
- [6] SABHADIYA, S. (2024): *What is Brass? - Its Properties, Types, and Uses*. The Engineering Choice. [Online], <https://www.theengineeringchoice.com/what-is-brass-its-properties-types-and-uses/>

# Prídavky pre zápustkové výkovky

**Borislav Melo, Ing., PhD.**

Viena International, spol. s r. o.  
Dolné Kráčiny 2, 036 01 Martin  
E-mail: melo@viena.sk

## Allowances for drop forgings

**Abstract:** The presented article focuses on the issue of determining allowances for semi-finished products manufactured by drop forging technology. The advantages of this method of manufacturing semi-finished products and its shortcomings are pointed out. The relations for determining allowances for this type of semi-finished product are published. The text is supplemented with diagrams of the layers of allowances on the surface of the parts.

**Keywords:** semi-finished products, forming, forging, die, addition.

## ÚVOD

Zápustkové kovanie patrí medzi najdôležitejšie spôsoby tvárnenia kovov za tepla. Ide o proces, pri ktorom sa kovový polotovár v plastickom stave vtlača do tvaru dutiny kovovej formy - zápustky. Tento postup umožňuje vyrábať presné, pevné a tvarovo zložité súčiastky.

Pri zápustkovom kovaní sa ohriaty polotovár (najčastejšie oceľ alebo hliníková zliatina) vloží medzi dve časti zápustky - hornú a dolnú. Tieto časti majú dutinu zodpovedajúcu tvaru požadovaného výkovku. Po uzavretí zápustky pôsobí na materiál veľká sila pomocou lisu alebo bucharu, čím sa kov plasticky pretlačí do celej dutiny. Prebytočný materiál sa vytlačí do výronku. Po ochladení sa výkovok vyberie a odstráni sa výronok. Tento spôsob umožňuje vyrábať presné, pevné a tvarovo zložité súčiastky s minimálnym odpadom materiálu a používa sa hlavne pri hromadnej a sériovej výrobe, kde sa kladie dôraz na pevnosť a presnosť výkovkov [1-4].

*Hlavné fázy zápustkového kovania:*

1. Ohrev polotovaru na tvárnoplastickú teplotu (pre oceľ 1100 ÷ 1250°C).
2. Vloženie polotovaru do spodnej časti zápustky.
3. Kovanie úderom alebo tlakom hornej zápustky.
4. Vytvorenie výkovku a výronku.
5. Odstránenie výkovku, odstrihnutie výronku a tepelné spracovanie.
6. Tepelné spracovanie pre zlepšenie vlastností.

*Typy zápustkového kovania:*

- otvorené zápustkové kovanie - zápustka nie je úplne uzavretá, časť materiálu sa vytlača do výronkovej drážky. Používa sa pri väčších kusoch,

- uzavreté zápustkové kovanie (presné kovanie) - materiál je uzavretý v dutine, nevzniká výronok. Tento spôsob umožňuje vyššiu presnosť a menšiu spotrebu materiálu, no vyžaduje veľmi presnú prípravu polotovaru.

*Používané stroje:*

Zápustkové kovanie sa vykonáva na:

- kováčskych lisoch (mechanické, hydraulické, skrutkové),
- kováčskych bucharoch,
- automatických kovacíh linkách.

*Výhody zápustkového kovania:*

- vysoká pevnosť a húževnatosť výkovkov,
- výborné mechanické vlastnosti - vlákna materiálu sledujú tvar výkovku,
- možnosť výroby zložitých tvarov,
- menšia spotreba materiálu ako pri obrábaní,
- dobrá rozmerová a tvarová presnosť,
- možnosť sériovej výroby.

*Nevýhody zápustkového kovania:*

- vysoké náklady na výrobu zápustiek,
- obmedzená veľkosť výkovkov,
- presné dávkovanie materiálu,
- menej vhodné pre kusovú výrobu alebo prototypy.

Pri výrobe súčiastok obrábaním je nevyhnutné dbať na presnosť rozmerov, tvarov a kvalitu povrchu. Aby sa dosiahla požadovaná presnosť po všetkých operáciách obrábania, je na výkovku ponechaná vrstva materiálu - *prídavok na opracovanie*.

Správne stanovenie prídavkov je kľúčové pre hospodárnosť výroby, pretože ovplyvňuje spotrebu

materiálu, čas obrábania, opotrebenie nástrojov a konečnú kvalitu výrobku [5, 6].

## 1 POJEM A VÝZNAM PRÍDAVKU NA OPRACOVANIE

*Prídavok na opracovanie* je vrstva materiálu, ktorá sa musí pri obrábaní odstrániť z povrchu polotovaru, aby sa dosiahol požadovaný tvar, rozmer a drsnosť povrchu hotovej súčiastky.

*Hlavné úlohy prídavku:*

- odstránenie vrstvy materiálu znehodnotenej predchádzajúcim tvárnením (napr. zoxidovaný povrch po odlievaní alebo okuje po kovaní),
- vyrovnanie geometrických nepresností polotovaru,
- dosiahnutie požadovanej presnosti a kvality povrchu,
- vytvorenie miesta pre následné dokončovacie operácie.

### 1.1 Druhy prídavkov na opracovanie

Prídavky sa rozdeľujú:

a) *Podľa spôsobu výroby polovýrobku:*

Typ polotovaru	Charakteristika povrchu	Odporúčaný prídavok [mm]
Odliatok (oceľ, liatina)	nerovný povrch, póry, oxidy	2 ÷ 6
Výkovok	zoxidovaný povrch, nepresnosti	1,5 ÷ 4
Valcovaný polovýrobok	relatívne rovný povrch	0,5 ÷ 2

b) *Podľa účelu opracovania:*

Druh opracovania	Charakter činnosti	Prídavok [mm]
Hrubovanie	Odstránenie väčšej vrstvy materiálu, tvarovanie	0,5 ÷ 3
Polodokončovanie	Vyrovnanie tvaru pred finálnym opracovaním	0,2 ÷ 1
Dokončovanie	Dosiahnutie presného rozmeru a kvality povrchu	0,05 ÷ 0,3

### 1.2 Faktory ovplyvňujúce veľkosť prídavkov

Správna voľba prídavku závisí od viacerých technologických faktorov:

Faktor	Vplyv na prídavok
Presnosť a kvalita polotovaru	Čím je polovýrobok presnejší, tým menší prídavok.
Tvrdosť a vlastnosti materiálu	Tvrde materiály vyžadujú menší prídavok kvôli opotrebeniu nástroja.

Faktor	Vplyv na prídavok
Spôsob upnutia a tuhosť sústavy	Prídavok kvôli možným vibráciám.
Typ obrábacieho stroja	CNC stroje umožňujú menšie prídavky vďaka vyššej presnosti.
Požadovaná drsnosť povrchu	Jemnejší povrch = menší prídavok na finálne opracovanie.

### 1.3 Stanovenie prídavkov

Prídavok sa určuje podľa výpočtu, empirických tabuliek alebo skúseností technológa. Základný vzťah:

$$Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 + \dots + Z_n \quad (1)$$

kde  $Z$  - celkový prídavok na opracovanie,

$Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_n$  - prídavky na jednotlivé operácie (hrubovanie, polodokončovanie, dokončovanie).

#### 1.3.1 Význam optimálneho prídavku

Nesprávne stanovený prídavok môže spôsobiť:

- *príliš veľký prídavok* → zvýšená spotreba času, nástrojov a energie,
- *príliš malý prídavok* → nedosiahnutie presnosti alebo ponechanie chýb na povrchu.

Optimálny prídavok zaručuje:

- *hospodárne využitie materiálu,*
- *kratší čas obrábania,*
- *menšie opotrebenie nástrojov,*
- *požadovanú presnosť a kvalitu výrobku.*

*Všeobecný príklad použitia v praxi*

Pri výrobe ojnice (zápustkovo kovaný polotovár) sa používajú prídavky:

- čelné plochy: 1,5 mm,
- diery pre čapy: 0,5 mm,
- vonkajšie obrysy: 1,0 mm.

Po dokončení sa dosiahne presnosť IT7 ÷ IT8 a drsnosť povrchu  $Ra$  1,6 ÷ 0,8  $\mu m$ .

Podľa prídavkov na obrábanie môžu byť zápustkové výkovky rozdelené do skupín podľa prídavkov na obrábanie:

- výkovky ktoré idú na montáž bez akéhokoľvek obrábania povrchu,
- výkovky s minimálnymi prídavkami na obrábanie (brúsenie a leštenie)
- prídavky na obrábanie iba niektorých povrchov,
- obrábané zo všetkých strán.

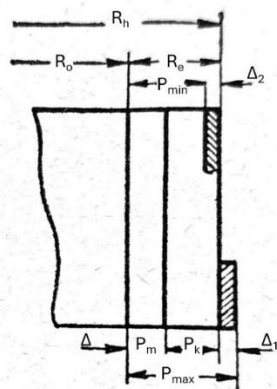
Spojitosť medzi prídavkami a presnosťou zápustkového kovania sa zistí rozborom prídavku. Úplný prídavok  $P$  na polovýrobok pre strojné obrábanie je súčtom kováčskeho prídavku  $P_K$

s celkovým medzioperačným prídavkom  $P_m$  pri strojnom obrábaní:

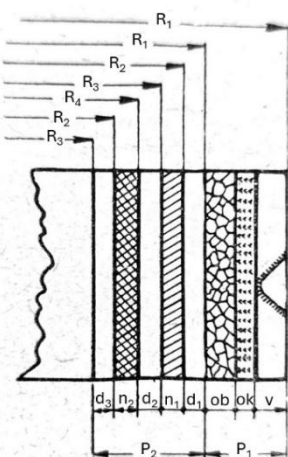
$$P = P_k + P_m \quad (2)$$

Úplný prídavok uvádzaný na výkrese výkovku je menovitým prídavkom  $P_J$ . Vypočíta sa ako polovičný rozdiel menovitého rozmeru polovýrobku  $R_j$  a čistého rozmeru súčiastky  $R_o$ . Úplný maximálny prídavok  $P_{max}$  sa skladá z menovitého prídavku spočítaného s hodnotou kladnej tolerancie  $\Delta_1$ . Celkový minimálny prídavok sa skladá z menovitého prídavku zmenšeného o hodnotu zápornej tolerancie  $\Delta_2$ . Zostrojenie hlavných rozmerov polovýrobkov a prídavkov na obrábanie je znázornené na obr. 1 a obr. 2. Skutočný prídavok  $P_S$  je vlastne polovičný rozdiel skutočného rozmeru polovýrobku  $R_s$  a čistého rozmeru súčiastky:

$$P_s = R_s - \frac{R_o}{2} \quad (3)$$



Obr. 1. Štruktúra výkovku vyrobeného v zápustke



Obr. 2 Štruktúra úplného prídavku na zápustkový výkovok

Parametre na obr. 2 sú nasledovné:

$v$  - hĺbka vysekania,

$o_k$  - okuje,

$o_{du}$  - oduhličenie,

$t_1$  - tolerancia pri hrubovaní,

$p_1$  - minimálny prídavok pre jemné sústruženie,

$t_2$  - tolerancia (jemné sústruženie),

$p_2$  - minimálny prídavok na brúsenie,

$t_3$  - tolerancia pri brúsení,

$p_k$  - kováčsky prídavok,

$p_m$  - celkový medzioperačný prídavok na strojné obrábanie,

$R_1$  - maximálny rozmer zápustkového výkovku,

$R_2$  - maximálny rozmer výrobku,

$R_3$  - minimálny rozmer výrobku,

$r_1$  - maximálny rozmer (jemné sústruženie po hrubovaní),

$r_2$  - minimálny rozmer (jemné sústruženie po hrubovaní),

$r_3$  - maximálny rozmer (brúsenie po jemnom sústružení),

$r_4$  - minimálny rozmer pre brúsenie po jemnom sústružení.

## ZÁVER

Prídavky na opracovanie predstavujú dôležitú súčasť technologickej prípravy výroby. Ich správne určenie má zásadný vplyv na kvalitu, presnosť a ekonomiku obrábania [7, 8]. V moderných výrobných procesoch, najmä pri použití CNC strojov a presných polotovarov, sa prídavky minimalizujú, čím sa dosahuje vyššia efektívnosť a úspora materiálu. Zápustkové kovanie je efektívny spôsob výroby kovových súčiastok s vysokými nárokmi na pevnosť, presnosť a kvalitu. Hoci vyžaduje značné počiatkové investície do zápustiek a zariadení, pri sériovej výrobe je ekonomicky veľmi výhodné. Vďaka svojim vlastnostiam si tento proces dlhodobo udržuje dôležité miesto v strojárskych výrobných procesoch.

## LITERATÚRA

- [1] MORAVEC, J. (2015): *Teória tvárnenia kovov*. EDIS Žilina, ISBN 978-80-554-1095-1.
- [2] MIELNIK, E. M. (1991): *Metalworking Science and Engineering*. MC Graw-Hill Book Comp, New York.
- [3] MORAVEC, J. - BILÍK, J. (2022): *Technológia tvárnenia v 99 heslách*. EDIS Žilina, ISBN 978-80-554-1906-0.
- [4] BAČA, J. - BILÍK, J. (2000): *Technológia tvárnenia*. STU, ISBN 80-227-1339-2.
- [5] LANGE, K. (2004): *Lehrbuch der Umformtechnik, Band 2*. Springer Verlag Berlin.
- [6] GAJDOŠ, F. (1990): *Teorie tváření*. Brno, ISBN 80-214-1032-9.
- [7] JOHNSON, W. - MAMALIS, A. G. (1988): *Plasticity and metal forming*. Cambridge.
- [8] KOLSKY, H. (1987): *Stress Waves in Solids*. Oxford at the Clarendon Press.

---

# Modernization of company to digital processes by implementing a new data approach for industrial operations

---

## Vladimíra Biňasová, Ing., PhD., DiS.\*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: vladimira.binasova@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2727

## Branislav Mičieta, prof. Ing., PhD.

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: branislav.micieta@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2701

## Marta Kasajová, Ing., PhD.

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: marta.kasajova@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2707

## Ján Zuzik, Ing.

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: jan.zuzik@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2710

**Abstract:** This paper focuses on the critical role of data as a key asset in the modern enterprise. The proposed approach involves the creation of an integrated data architecture that enables the collection, processing, analysis and visualization of real-time data from various industrial sources (e.g. *IoT* sensors, manufacturing systems, *ERP*). A key aspect is the application of advanced analytical methods, including machine learning, for predictive maintenance, quality optimization and energy consumption management.

**Keywords:** digital processes, industrial data fabric solution, industrial engineering.

---

## INTRODUCTION

Data is crucial for all industrial activities, procedures, and business choices. Innovative manufacturers leverage data for insights that fuel progress, but these initiatives are often isolated and don't expand to different company-wide uses. This is because industrial data infrastructure is usually widespread, disconnected, and intricate, with various datasets scattered across repositories, databases, connected devices, and local systems. Furthermore, the equipment, sensors, and instruments in industrial settings produce a large, complex stream of performance, real-time, and other unstructured information.

Additionally, separate *IT* and operational technology datasets create not just technical difficulties but also cultural and organizational issues, making integration

challenging. Consequently, manufacturers find it difficult to identify the location of all their data, how to effectively connect and utilize it, and how to control data access. A contemporary, all-encompassing industrial data approach connects, integrates, and facilitates access to the vast amounts and types of data created in an industrial environment to speed up engineering processes, improve operations, reshape supply networks, and much more. It offers a managed, data-oriented method that can be affordably extended across company-wide applications to achieve business results.

An industrial data approach not only eliminates data divisions but also organizes data and improves availability, enabling manufacturers to take advantage of advanced, real-time, and predictive analysis or use generative artificial intelligence (*gen AI*) [1] and ([9]

machine learning (*ML*) [2] to enhance operations.

## 1 INDUSTRIAL DATA FABRIC SOLUTIONS

Without a well-defined plan for handling information, many businesses in the manufacturing sector begin with a specific application, like anticipating equipment failures, at one of their facilities. They often conduct a trial run, and if it goes well, they choose to implement it at other locations. However, because these locations have varying information arrangements, different guidelines, and diverse instruments, the solution that performed effectively in the initial instance might not function in others—even if the issue is precisely the same.

A more effective method for digital change is to initially oversee all the information across the company before starting a specific application. [3] Companies that adopt this approach prepare themselves to tackle numerous applications, with significantly less time and resources and a much higher likelihood of success [4].

Furthermore, implementing information management on a large scale fosters increased creativity and adaptability throughout the entire organization. Descriptions of industrial data fabric solution (Figure 1) are:

- ingest: gathering and processing data from different sources, whether it arrives in batches, as a continuous stream, or sporadically,
- store: saving the data and keeping track of how different pieces of information relate to each other, even as the original data is updated,
- contextualize: refining the data through cleaning, filtering, filling in missing values, and applying other data preparation techniques, which may involve using machine learning. This also involves harmonizing various data types, particularly by ensuring consistent timestamps,
- act: making the data available to users in the formats they require. This often entails enabling two-way communication between users and the data system, allowing them to interact with the underlying systems and applications.

Cloud computing solutions, widely utilized across numerous sectors, have facilitated operational transformations for a substantial number of industrial organizations by harnessing data-driven insights to enhance effectiveness, standards, and ecological responsibility. This paper explores how a holistic industrial data approach can enable superior asset data oversight and yield beneficial outcomes for your enterprise.

Leveraging cloud-based simulation, virtual desktop environments offering secure and adaptable remote

accessibility, and *high-performance computing (HPC)* resources, design and engineering groups can improve their responsiveness and foster greater innovation. Consequently, product designs reach the production phase more rapidly, shortening the overall development cycle. Performing design and assessment activities within a virtual environment proves to be a quicker and more economical approach compared to the creation of physical prototypes. When implemented on cloud infrastructure, the appropriate *HPC* capabilities empower product developers and engineers to address intricate challenges through the utilization of two-dimensional and three-dimensional model-driven design methodologies and extensive, parallel simulations.



Fig. 1. The industrial data fabric solution [6]

This leads to a decrease, or even the complete removal, of time invested in the creation of physical prototypes. Product development teams gain the capability to investigate manufacturable outcomes early in the developmental procedure, allowing for optimization across cost, materials, and optimal production processes. Through the efficient execution of substantial simulations and parameter variations, *HPC* facilitates expedited advanced simulation, thereby minimizing the time required to achieve results and market entry. For generative design and generative artificial intelligence, which enable engineers to generate a vast range of design possibilities by specifying parameters and limitations, *HPC* can perform numerous simulations within a time frame of hours as opposed to days. Furthermore, *AWS IoT* streamlines the construction of digital replicas, enhancing comprehension of new designs prior to the prototyping stage.

## 2 IMPROVING SUPPLY CHAIN VISIBILITY

Addressing supply chain transparency and robustness, a collaborative effort between *Carrier and Web Services (WS)* aims to minimize food wastage within the temperature-controlled distribution network. *WS* facilitates digital modernization to promote food sustainability across the complete spectrum of stakeholders, including suppliers, producers, logistics

providers, consumers, and related entities. As an exemplar, *Carrier* and *WS* have partnered to create *Lynx*, a digital platform designed to consolidate the fragmented cold chain sector, reducing food spoilage, enhancing complete visibility, and optimizing efficiency throughout refrigerated storage and transportation phases.

Acknowledging that multi-organizational supply chains represent intricate networks characterized by loosely integrated providers and disparate technological infrastructures with limited data or system interoperability, the text highlights the particular challenges of cold chains, where interruptions can compromise perishable goods. *Lynx* leverages *WS's* *Internet of Things (IoT)*, *Machine Learning (ML)*, and data analytics infrastructure to offer clients a holistic perspective encompassing cargo location, temperature regimes, and external factors that might influence cold chain operations. *Carrier* can also employ *ML* to detect potential risks to food cargo and subsequently formulate proactive recommendations to mitigate or avert those risks.

Considering the recent escalation of supply chain instability due to resource scarcity, geopolitical dynamics, and natural disasters, the text emphasizes the imperative for manufacturing organizations to anticipate supply chain vulnerabilities, rapidly adapt to fluctuating consumer demand, and control costs. Supply chain analytics are critical for organizations to perceive, evaluate, and respond to substantial disruptions. Utilizing *WS* data services, such as *Forecast and Managed Blockchain*, organizations can construct supply chains that deliver unified data insights with comprehensive visibility, enabling improved predictive capabilities for enhanced decision-making [9].

*WS Supply Chain* assists in monitoring and tracing the entire production lifecycle, enabling data-driven decisions via *ML*, mitigating inventory risks, and decreasing operational expenditure.

Elements of a resilient supply chain are shown in Fig. 2.

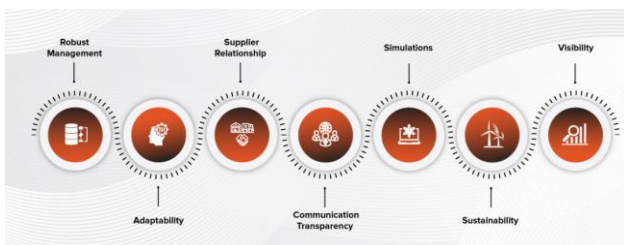


Fig. 2. Elements of a resilient supply chain [7]

*Robust management* - management's crucial understanding of their end-to-end workflow is the key to driving their supply chain success. And for that, the leadership needs to comprehend the potential vulnerabilities in their process. All this constitutes in

the form of an astute planning framework covering challenges, capabilities, skillset, resource availability, and financial prowess to minimize any potential disruption impact. The smarter way to cover all these pillars is through analysis on the back machine learning algorithms and artificial intelligence platforms [5].

*Adaptability* - in the face of anomalies, the biggest virtue that keeps a resilient supply chain league above the rest is its ability to adapt to changing dynamics quickly. Qualities such as adjusting to the evolving customers' demands, economic fluctuations, global disruptions, and more define how much flexibility is coming to the fore from a workflow point of view. However, in some organizations, the presence of archaic methods, the presence of siloed data, the lack of collaboration amongst internal teams, and the absence of technological support dial the effort for proactivity to nadir, leading resiliency to be a distant dream [8].

*Supplier relationship* - the role of suppliers in bolstering the robustness of the entire process cannot be highlighted more. So, when an *SCM* invests in transparent communication and efficient networking, the collaboration finds more pace and results in a more synced-up execution of an action plan in the face of a value chain bottleneck. The best instance for one is when the spiked-up demand from customers during a holiday season turns up. It's during instances like these that suppliers' capabilities come to the fore in the form of scaling up their resourcefulness by matching up increased raw materials supply while keeping the quality intact - and contributing towards supply chain performance.

*Communication transparency* - an organization's turnaround time is very limited when a disruption arises. At these crucial junctures, time is of the most significant essence. It's at instances like these that accurate communication should be passed on to every stakeholder on board with the action plan. On the back of clear communication, enterprises can navigate potential aftereffects of a supply chain hurdle through synced-up responses and intelligent decisions while keeping the data security and compliance strategies intact. These well-orchestrated efforts lead to better brand value and ascension in market standing.

*Simulations* - it always helps when *SCM* has a clear setup of action plans well known of their efficacy. These simulations cover all possibilities for building risk management capabilities that instil agility to react seamlessly to fluctuating market scenarios. These simulations contribute immensely to the long-term resiliency game of the value chain, helping stakeholders cover almost every outcome attached to different scenarios. This makes the process efficient, purpose-driven, and productive, helping save time and resources.

*Sustainability* - a well-known fact that sustainability forms an essential foundation for a resilience roadmap. Companies that use sustainable resources tend to have a more robust framework owing to environmental-first packaging, optimized transportation, and ethical sourcing practices. To add further, since a sustainable framework requires a considerable network of stakeholders, a vast supplier network is employed to ensure diversity and continuity in the process.

*Visibility* - having proper tabs on your workflow paints the right picture for the subsequent action ahead. Visibility of inventory levels and accurate demand helps management plan judiciously according to their financial requirements and the resources required for seamless functioning. Even from an operational point of view, visibility keeps in check the supplier's performance to process' efficacy to detect any anomaly that might contribute to internal disruption. All this catalyses to better contingency planning, too.

## CONCLUSIONS

The path towards groundbreaking advancements commences with information, and the effective transformation into an organization guided by data necessitates the adoption of a contemporary industrial data approach that broadens access to information. *The Industrial Data Fabric (IDF)* offerings on *Web Services (AWS)* establish the essential groundwork for manufacturing entities to structure information comprehensively, consolidate information administration, guarantee fluid information accessibility, harmonize oversight mechanisms.

## Acknowledgement

*This work was supported by project contract No. VEGA 1/0633/24 and by project contract No. KEGA 011ŽU-4/2025.*

## REFERENCES

[1] ANTONIUK, I. - SVITEK, R. - KRAJČOVIČ, M. - FURMANNOVA, B. (2021): *Methodology of design and optimization of internal logistics in the concept of Industry 4.0*. In: *Transportation Research Procedia*, 55, 503-509.

[2] BUCKOVA, M. - GASO, M. - PEKARCIKOVA, M. (2020): *Reverse logistic*. In: *InvEnt 2020: Industrial engineering - Invention for enterprise - proceedings*. Bielsko-Biala: Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humanistycznej.

[3] BURGANOVA, N. - GRZNAR, P. - MOZOL, S. (2020): *Design of logistics system in production*. In: *Technologie, procesy i systemy produkcyjne*. Bielsko-Biala: Wydawnictwo naukowe Akademii techniczno-humanistycznej w Bielsku-Bialej, p. 11-18, ISBN 978-83-66249-56-1.

[4] FILIPOVA, I. - DULINA, L. - BIGOSOVA, E. - PLINTA, D. (2021): *Modern Possibilities of Patient Transport Aids*. In: *Transcom 2021. Virtual conference 26 May - 28 May, Slovakia*. *Transportation Research Procedia*, 55, pp. 510-517.

[5] SUKALOVA, V. - STOFKOVA, Z. - STOFKOVA, J. (2022): *Human Resource Management in Sustainable Development*. In: *Sustainability*, 14(21), 142.

[6] BIŇASOVÁ, V. - MIČIETA, B. - KASAJOVÁ, M. - ZUZIK, J. (2025): *Progress in advanced industrial engineering = Sheet metal forming with high released energy*. In: *Technológ. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline*, Vol. 17, No. 2, pp. 91-94, ISSN 1337-8996.

[7] BUZALKA, M. - BUBENÍK, P. - DULINA, Ľ. (2025): *Applications of artificial intelligence in transport and logistics processes*. In: *InvEnt 2 - Invention for Enterprise*, 16.06. - 18.06., Štrbské Pleso, 025. 1. vyd., Bielsko-Biala, Poľsko: Fundacja Centrum Nowych Technologii, pp. 14-19, ISBN 978-83-947909-9-8.

[8] BUBENÍK, P. - RAKYTA, M. - BUZALKA, M. - BIŇASOVÁ, V. - KOVARÍKOVÁ, Z. (2025): *Optimization of Business Processes Using Artificial Intelligence*. In: *Electronics*, Vol. 14, No. 11, 2105, ISSN 2079-9292.

[9] MIČIETA, B. - HOWANIEC, H. - BIŇASOVÁ, V. - BUZALKA, M. (2025): *Financial performance analysis and indicator-based improvement strategies in a selected company*. In: *European research studies journal*. Piraeus (Grécko): International Strategic Management Association, Vol. 28, No. 3, pp. 482-499, ISSN 1108-2976, ISSN (online) 3057-4331.

---

# Additive manufacturing technology

---

## Ivana Domaniková, Ing.

Department of Transport and Handling Machines, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: [ivana.domanikova@fstroj.uniza.sk](mailto:ivana.domanikova@fstroj.uniza.sk), Tel.: + 421 41 513 2659

## Miroslav Blatnický, doc., Ing., PhD.

Department of Transport and Handling Machines, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: [miroslav.blatnický@fstroj.uniza.sk](mailto:miroslav.blatnický@fstroj.uniza.sk), Tel.: + 421 41 513 2659

## Ján Dižo, doc., Ing., PhD.

Department of Transport and Handling Machines, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: [jan.dizo@fstroj.uniza.sk](mailto:jan.dizo@fstroj.uniza.sk), Tel.: + 421 41 513 2560

## Patrik Slušňák, Ing.

Department of Transport and Handling Machines, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: [patrik.slusnak@fstroj.uniza.sk](mailto:patrik.slusnak@fstroj.uniza.sk), Tel.: + 421 41 513 2659

**Abstract:** The article presents an informative overview on the challenges of additive manufacturing technologies. It highlights various methods and their practical applications. Additive manufacturing offers an innovative approach to producing a wide range of objects by depositing material layer by layer according to a digital model. The article describes the fundamental operating principles, commonly used materials, and key areas in which additive manufacturing is implemented. We will describe the benefits of using this manufacturing method, including product customization, reduced material waste, and shorter production times. Our aim is to acquaint the reader with the technology of additive manufacturing and the principles underlying its operation.

**Keywords:** additive manufacturing, manufacturing, 3D printing.

---

## INTRODUCTION

Additive manufacturing, commonly referred to as 3D printing, is not a recent invention, however it continues to gain significance due to its numerous advantages [2].

It is used to create a wide range of objects based on a digital model, which is possible to produce a solid three-dimensional object [2].

We recognize several additive manufacturing techniques, for example FDM technology, FFF and others. FFF method is one of the most used additive manufacturing techniques in the world [2].

Additive manufacturing includes the processes, where thin printed layers of material are deposited with a bottom-up application [1].

This technological advancement has gained popularity and is often used by general public regarding its advantages and simplified manufacturing process. For example, it can reduce

costs due to budget when designing a new product or producing new inventions and prototyping [1, 2].

## 1 HISTORICAL BACKGROUND

Additive manufacturing has progressed at a crucial pace since its invention dating back to roughly 50 years ago. During this time and now it has had significant impact on both commercial world and industrial sector [3].

Back in the 80's, additive manufacturing techniques were considered suitable only for creation of prototypes. At that time, these methods were referred to as rapid prototyping. One of the first researchers contributing to this field was *Dr. Hideo Kodama*. The technology described by him was a UV-curable, layer-based fabrication, which later became important in the development of *Stereolithography (SLA)* [3]. In years 1987 and 1988, two of many additive manufacturing methods were developed,

such as *Laser Sintering (SLS)* and *Fused Deposition Modelling (FDM)*, both of which are still used nowadays [4].

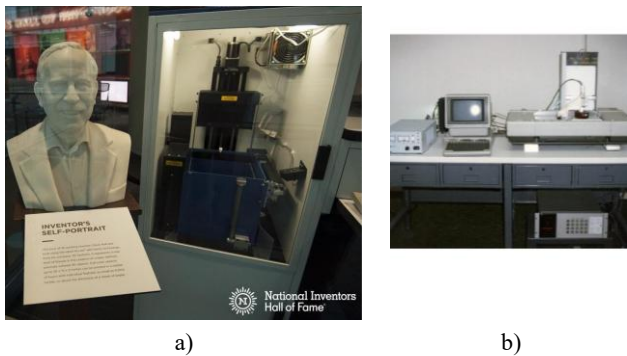


Fig. 1. a) View of the *SLA* Additive manufacturing method and its founder, b) worlds first commercial released *SLA* machine (printer) [6]

In 2019 the quality, precision and material range of these methods had increased to the point that processes of this method are considered nowadays as a key development in many fields, such as mechanical engineering, electrical, medicine and other fields. This method has been since then spread among wide range of specialized fields and applications [4].

## 2 GENERAL PRINCIPLES OF ADDITIVE MANUFACTURING

The technique used for Additive manufacturing uses processes, where fine printed layers based on computer modelling are deposited following a bottom- up approach [1].

This approach is based on an outcome of *3D CAD* data file. The following process described in the upper section consist mainly of 2 steps, which are repeated until the part is manufactured:

1. Formation of an individual layer, where the geometry and thickness are prescribed by the digital cross-section of the model.
2. Integration of each subsequent layer with the preceding one, resulting in a continuously accumulated structure [10].

This process is showing that with increasing the layer thickness of the part, the stair step effect is shown. This effect is typical for additive manufacturing [10].

Standard thickness of a layer is around 0.1 mm and can be reduced to approximately 0.016 mm, regarding the process used. Reducing the thickness means increasing the exactness of the parts and number of layers, which are required, also the manufacturing time, and the data volume [10].

Layer thickness of the product depends on used material forming the stair step effect. Hard materials such as metals and ceramics usually require more

extensive finishing process than softer materials, like plastics [10].

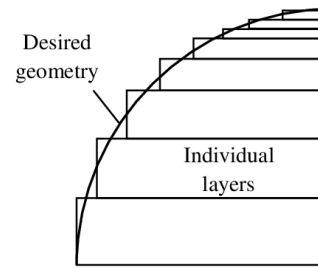


Fig. 2. The comparison between designed object and the outcome of the printed product using stair- step approach in Additive manufacturing [14]

## 3 MOST COMMON ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES

There are many technologies in additive manufacturing. For the purpose of this article, we outline only the following technologies, which are the most commonly used upon this field, namely *FDM*, *FFF*, *SLA*, *DLP*, *SLS*, Material jetting, Binder jetting and *DMLS*, *SLM*, *EBM*. The methods are described in the paragraphs below.

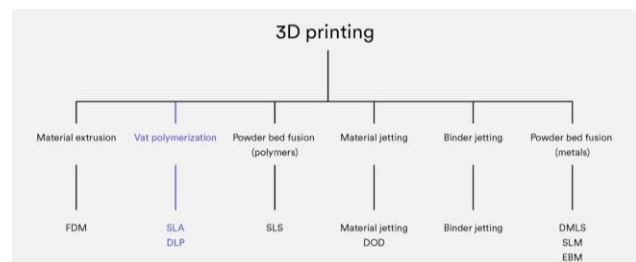


Fig. 3. Types of additive manufacturing - simplified scheme [7]

**Material extrusion** - *Fused Deposition Modelling (FDM)* or *Fused Filament Fabrication (FFF)* printing is a technology based on melting the material, often using plastic string, which is named filament. It is stored in the storage of an 3D printer on a spool, from where the printer unwinds needed material continuously until the end of printing process. The material is then melted by a heating extruder and layers the outcome product via bottom-up approach as described in the previous chapter [2].

**Polymerization** - *Stereolithography (SLA)* and *Digital light processing (DLP)* rely on photopolymerization of liquid resin, such as acrylate, epoxy and vinyl ether type, which are initiated through exposure to ultraviolet radiation. [10]

**Powdered bed fusion (polymers)** – *Selective laser sintering (SLS)* is a method, which uses laser beam to melt or selectively sinter a polymer powder into an object. [10]

**Material jetting** - first technique is a continual ink-jet printing, namely *Continuous Inkjet Printing (CIP)*, where a stream of droplets is extruded through a nozzle continuously, where the Rayleigh principle of

instability is used to separate the jetted stream into droplets. Second technique in material jetting is *Drop on demand (DOD)*. It is a technique in which the droplets are regulated and dispensed only when it is needed through heat-related or digital piezo-electric signal [11].

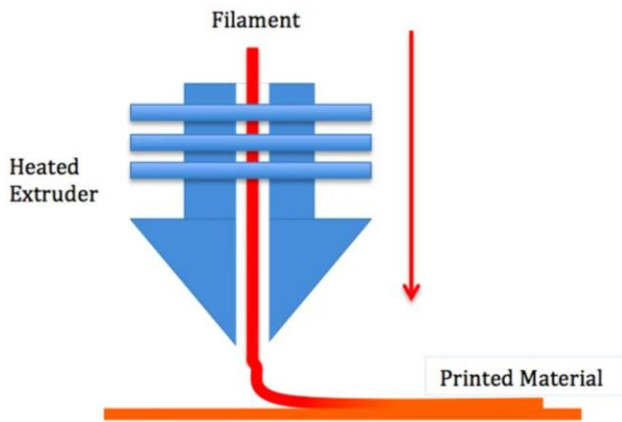


Fig. 4. Principle of function FDM [5]

*Binder Jetting* - this additive manufacturing technology is characterized by high efficiency in production and material utilization, also excellent compatibility with multiple materials. *BJ* process consists of depositing liquid binder droplets onto a powder bed via printheads, which is followed by spreading the powder layer by layer and selectively binding it. When the part is formed, the binder is thermally removed, and densification is accomplished via sintering or infiltration. This method is not reliable on laser, electron beams or optical systems, which make it a cost-effective method [12].

*Powdered bed fusion (metals)* is a group of *AM*, where the energy source uses a selective bind or melted powder to build an object. This technology consists mostly of 3 methods. *Direct metal laser sintering (DMLS)* is a metal *AM* method based on powder-bed fusion, where a laser beam selectively processes thin layers of metal powder. *Selective laser melting (SLM)* is a process, which is used, when there is need for complexly shaped, hollowed slender objects with thin walls. This process is using a power-dense laser to melt the metal powder in a powder bed, to create a solid object. *Electron beam melting (EBM)* is an *AM* technique used for metals, using a high-energy electron beam, to melt the metal powder (rather than a laser) in a controlled vacuum chamber [13].

## 5 MATERIALS IN ADDITIVE MANUFACTURING

From the invention of this technology, the most common used materials among this manufacturing method are mostly *acrylic, plastic, polymers* and *resin* [1].

With the development of material science *AM* has been used for fabricating parts from composites of polymer, polymer powders, granules, ceramics and metals. [1]

The most used material among methods in Additive manufacturing is polymer, used for in *SLA*, powdered bed fusion processes such as *SLS*, extrusion processes in *FDM*, material jetting processes in poly jet printing and sheet lamination in laminating object manufacturing. Polymer or polymer composites are beneficial when manufacturing lightweight and complex geometries with geometrical tolerances that are narrow or observed closely for size. Polymer prints in optimized processes benefit in improved accuracy, surface texture and strength in the result printed object. [1]

They are also resistant against UV light and suitable for high temperature applications, and we also benefit from their low price compared to other methods in additive manufacturing. [1]



Fig. 5. Various shapes printed parts from Polymer [8]

Usage of metal powders in *AM* is increasing, but comparing it to polymer materials, the metal is slowly built and higher in cost. Also, the disadvantage of the metal in this method is, that it has not been so developed compared to polymers. There is a limited number of metals that are printed and depending on the machines used, the limiting factor is also that the sizes of metal parts and porosity are a limiting factor that affect strength of printed objects [1].



Fig. 6. Printed metal parts [9]

## CONCLUSION

Additive manufacturing represents a continuously evolving group of production strategies that rely on the controlled accumulation of material to generate three-dimensional structures directly from digital data. This paper has outlined the historical trajectory that led to the establishment of modern *AM* systems, clarified the operational principles that govern layer-wise fabrication, and compared the primary technological categories currently in use. The discussion also addressed the material domains that these technologies support and the implications of material selection for the performance and integrity of fabricated components. Overall, the article summarized the most commonly used techniques which are used in additive manufacturing, such as *FDM*, *FFF*, *SLA*, *SLS*, *DLP*, *CIP*, *DOD*, binder and material jetting and highlighted the materials connected to those methods, providing a comprehensive overview of the field.

## Acknowledgements

*This research was created within the following projects: VEGA 1/0037/25, KEGA 031ŽU-4/2023. The authors thank for the support.*

## REFERENCES

- [1] EQUBAL, A. M. - EQUBAL, A. - KHAN, Z. A. - BADRUDDIN, I. A. (2024): *Machine learning in additive manufacturing: A comprehensive insight*. [online]. 2024 [Cited 21.11.2025]. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2588840424000933>
- [2] DOMANIKOVÁ, I. (2022): *Stavba funkčného modelu pásového dopravníka ako výučbového modelu pre študijný program Vozidlá a motory* [Bakalárska práca] (In Slovak)
- [3] SUBHI, J. A. et al. (2018): *3D printing applications in cardiovascular medicine*. Academic Press, ISBN 978-0-12-803917-5 [cited from <https://www.sciencedirect.com/book/edited-volume/9780128039175/3d-printing-applications-in-cardiovascular-medicine>]
- [4] 3D PRINTING, 2023. History of 3D printing [online]. 2023 [cited 21.11.2025]. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/3D\\_printing](https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing)
- [5] ČO JE FDM TLAČ? (In Slovak) 2022 [Cit. 24.11.2025]. Available at: <http://sk.insta3dm.com/info/what-is-fdm-3d-printing-simply-explained-72004797.html>
- [6] THE HISTORY OF 3D PRINTING: 3D PRINTING TECHNOLOGIES FROM THE 80S TO TODAY. [Cit. 24.11.2025] Available at: <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/basics-of-3d-printing/the-history-of-3d-printing/>
- [7] WHAT IS SLA PRINTING? THE ORIGINAL RESIN 3D PRINT METHOD. [Cit. 24.11.2025] Available at: <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sla-3d-printing/>
- [8] POLYMER 3D PRINTING IS BEING DRIVEN BY MATERIAL AND TECHNOLOGICAL INNOVATIONS. 2023 [Cit. 24.11.2025] Available at: <https://www.3dnatives.com/en/polymer-3d-printing-material-technological-innovations-140220236/#!>
- [9] HOW IS METAL 3D PRINTING TRANSFORMING SPACE TRAVEL? 2022 [cit. 24.11.2025]. Available at: <https://www.space.com/metal-3d-printing>
- [10] GEBHART, A. - KESSLER, J. - THURN, L. (2019): *3D PRINTING (SECOND EDITION) – Understanding Additive Manufacturing*. Munich, Carls Hanser Verlag / Hanser Publications. Page 33 - 40, ISBN 978-1-56990-702-3
- [11] ELKASEER, A. - CHEN, J. K. - JAHNSEN, C. J. - REFLE, O. - HAGENMEYER, V. - SCHOLZ, G. S. (2022): Material jetting for advanced applications: A state-of-the-art review, gaps and future directions. [Cit. 26.11.2025]. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S214860422006595>
- [12] KAI, Y. - ZHANG, Y. - CAI, J. - ZHANG, B. - QU, X. (2025): Research progress on densification behavior of component fabricated by Binder Jetting additive manufacturing. 2025 [Cit. 26.11.2025]. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S3050913025000737>
- [13] School of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan, China: 3D Printing of Metal – Printed edition of the Special Issue Published in Metals. Bazel, MDPI. Page 2 - 7. ISBN 978-3-0365-6864-5
- [14] BROOKS, H. - RENNIE, A. - ABRAM, T. (2025): Variable Fused Deposition Modelling – analysis of benefits, concept design and tool path generation. 2011 [Cit. 27.11.2025]. Available at: [https://www.researchgate.net/figure/Staircase-effect-in-layer-manufacturing-using-variable-layer-thickness\\_fig5\\_256504147](https://www.researchgate.net/figure/Staircase-effect-in-layer-manufacturing-using-variable-layer-thickness_fig5_256504147)

---

# Využitia umelej inteligencie pre tvorbu analýzy FMEA

---

## Peter Bubeník, doc. Ing., PhD.

Katedra priemyselného inžinierstva, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: peter.bubenik@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2719

## Miroslav Rakyta, doc. Ing., PhD.

KPI, SjF, ŽU Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: miroslav.rakyta@fstroj.uniza.sk , Tel.: +421 41 513 2737

## Martin Buzalka, Ing.

Katedra priemyselného inžinierstva, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: martin.buzalka@fstroj.uniza.sk , Tel.: +421 41 513 2713

## Vladimíra Biňasová, Ing., PhD., DiS. \*

Katedra priemyselného inžinierstva, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: vladimira.binasova@fstroj.uniza.sk , Tel.: + 421 41 513 2727

## Uses of artificial intelligence for creating FMEA analysis

**Abstract:** The identification and assessment of risks in manufacturing processes *FMEA* (*Failure Modes and Effects Analysis*) is proving to be an effective maintenance tool. With the advent of *artificial intelligence* (*AI*), new possibilities for a more intelligent and predictive approach to maintenance are emerging. This article deals with the principles of *FMEA* and the use of artificial intelligence.

**Keywords:** FMEA, artificial intelligence, risk assessment, prediction.

---

## ÚVOD

V modernom priemysle je spoľahlivosť výrobných zariadení kľúčová pre udržanie konkurencieschopnosti a efektívnosti. Neplánované odstávky spôsobené poruchami môžu viesť k významným finančným stratám a narušeniu výrobných plánov. Preto je nevyhnutné implementovať metódy, ktoré umožňujú predikciu a prevenciu porúch. Jednou z takýchto metód je FMEA, ktorá systematicky identifikuje potenciálne poruchy a hodnotí ich dopad na systém. Integrácia umelej inteligencie do FMEA prináša možnosť automatizácie a zlepšenia presnosti predikcií, čo vedie k efektívnejšiemu riadeniu údržby.

FMEA je systematický proces identifikácie a hodnotenia potenciálnych spôsobov zlyhania v systéme, produkte alebo procese a určenia ich následkov. Cieľom je identifikovať riziká, stanoviť

ich prioritu a navrhnúť opatrenia na minimalizáciu alebo elimináciu týchto rizík. FMEA umožňuje odhaliť možné problémy v raných fázach vývoja alebo výroby a prijať preventívne opatrenia na elimináciu alebo minimalizáciu rizík. Použitie FMEA pomáha zlepšiť kvalitu produktu, zvýšiť spoľahlivosť a zaistiť bezpečnosť pred nasadením do prevádzky.

Štúdia venovaná optimalizácii procesov na pracovisku s využitím umelej inteligencie sa zameriava na FMEA, ktorá sa riadi systematickým prístupom, ktorý zahŕňa sedem hlavných krokov:

- 1) Krok 1: plánovanie a príprava. Stanovenie rozsahu analýzy, definovanie cieľov a zhromaždenie potrebných informácií (historické dáta, technické špecifikácie, procesné diagramy).
- 2) Krok 2: Analýza štruktúry. Identifikácia a rozdelenie procesu do hierarchických úrovní.

- 3) Krok 3: Analýza funkcií. Každému elementu procesu sa priradia konkrétne funkcie, ktoré musí spĺňať. Správne formulovanie funkcií je kľúčové pre následnú analýzu možných porúch.
- 4) Krok 4: Analýza zlyhaní. Identifikácia možných zlyhaní a ich dôsledkov.
- 5) Krok 5: Analýza rizík.

Riziká sa hodnotia na základe troch hlavných kritérií:

- *S (Severity)* - závažnosť chyby,
- *O (Occurrence)* - pravdepodobnosť výskytu chyby,
- *D (Detection)* - schopnosť detekcie chyby.

Priradenie hodnôt závažnosti (*S*), výskytu (*O*) a detekcie (*D*) pre každý spôsob zlyhania a výpočet čísla priority rizika ( $RPN = S \times O \times D$ ).

- 6) Krok 6: optimalizácia. Na základe analýzy rizík sa definujú preventívne a kontrolné opatrenia na zníženie pravdepodobnosti zlyhania. Opatrenia sa následne validujú a sleduje sa ich efektívnosť.
- 7) Krok 7: dokumentácia výsledkov. Všetky výsledky analýzy *FMEA-P* sa systematicky zaznamenávajú do formálnej správy, ktorá obsahuje podrobné informácie o identifikovaných rizikách, prijatých opatreniach a záveroch analýzy.

## 1 PREHLAD VYUŽITIA UMELEJ INTELEGENCIE PRE TVORBU ANALÝZY MOŽNÝCH SPÔSOBOV A DÔSLEDKOV ZLYHANÍ

AI do *FMEA* predstavuje zásadný posun, ktorý zrýchľuje proces, zvyšuje presnosť a efektívnosť hodnotenia rizík. K uvedenej problematike bolo publikovaných niekoľko empirických štúdií. Štúdie sa zameriavajú na Automatizované generovanie dokumentácie *FMEA*: Použitie generatívnych jazykových modelov na tvorbu *FMEA* dokumentácie umožňuje rýchle a presnejšie zachytenie informácií o zložení aktív a ich zlyhaniach. Systém využívajúci veľké jazykové modely bol schopný správne vygenerovať viac ako polovicu kľúčového obsahu, čo potvrdili odborníci na spoľahlivosť [1].

Takáto metóda umožňuje skrátenie času potrebného na vypracovanie dokumentácie a zároveň zlepšuje jej kvalitu vďaka prístupu k rozsiahlym databázam existujúcich analýz zlyhaní. Identifikáciu spôsobov porúch pomocou strojového učenia: Kombinácia aktívneho učenia a *NLP* pomáha identifikovať spôsoby porúch z neštruktúrovaných záznamov o údržbe. Tento prístup vyžaduje anotáciu len 10 % záznamov, čo výrazne redukuje potrebu manuálnej práce pri značkovani dát [2]. Okrem toho môže AI identifikovať vzory v dátach a predikovať možné zlyhania na základe historických informácií, čím

pomáha pri plánovaní údržby. Zlepšenie riadenia rizík projektov v priemysle: Implementácia AI do *FMEA* zrýchľovala a zautomatizovala proces hodnotenia rizík. Použitie regresných modelov, ako napr. *Random Forest Regressor*, viedlo k presnejším predikciám pravdepodobnosti zlyhaní [ pripravil na náš problém výroby/údržby [3]. Táto metóda umožňuje podnikom lepšie riadiť bezpečnostné riziká a predchádzať oneskoreniam v projektoch. Optimalizácia *FMEA* pre mechatronické produkty: Metóda rozkladu funkcie-pohybu (*FMA*) spolu s alternatívnymi metódami váženého *RPN (IRPN)* zabezpečila lepšiu identifikáciu a hodnotenie rizík v oblasti mechatroniky. Kombinácia AI a analytického hierarchického procesu (*AHP*) zlepšila klasifikáciu kritických porúch [4]. Táto metodológia umožňuje presnejšiu analýzu rizík v robotických systémoch a ďalších komplexných technologických aplikáciách. Integrácia *FMEA* do priemyselných procesov a prediktívnej údržby: kombinácia *FMEA* s monitorovaním stavu zariadení v super-teplých elektrárnach poskytuje presnejšie predikcie kritických porúch. Tento prístup minimalizuje prestoje a zvyšuje spoľahlivosť systémov [5]. AI môže taktiež pomôcť pri implementácii *IoT* senzorov na kontinuálne monitorovanie prevádzky zariadení a včasnú detekciu anomálií. Optimalizácia *FMEA* pomocou genetických algoritmov a neurónových sietí: Kombinácia *FMEA*, metódy *Taguchi*, neurónových sietí a genetických algoritmov umožnila optimalizáciu odolnosti komponentov *DRAM*. Tento hybridný model znižoval experimentálny záber o faktor 85,3 [6].

Výskumy ukazujú, že genetické algoritmy môžu pomôcť optimalizovať výrobný proces a predchádzať výrobným defektom ešte v počiatočných fázach vývoja produktov. Automatizácia *FMEA* pre bezpečnostne kritické systémy: Automatické nástroje *FMEA*, integrujúce simulácie vstrekovania porúch, zjednodušili analýzu rizík a poskytli rýchlejšiu diagnostiku porúch v elektronických systémoch [7]. Tento prístup môže byť využitý aj v automobilovom priemysle na zlepšenie bezpečnosti autonómnych vozidiel. Aplikácia *FMEA* na robotické technológie v logistike: *FMEA* v kombinácii so softvérovými nástrojmi (*APIS, MS Excel*) sa ukázala ako efektívna pri zavádzaní robotizovaných *AGV/AMR* technológií do podnikovej logistiky, čo prispelo k zlepšeniu riadenia rizík a efektivity [8].

Zníženie chybovosti pri nasadzovaní týchto technológií vedie k väčšej prevádzkovej spoľahlivosti a nižším nákladom na údržbu. Strojové učenie pre automatizované hodnotenie rizík: Viacdielna klasifikácia na predpovedanie *RPN* hodnotí s presnosťou v rozmedzí 86,6 ÷ 93,2 % zrýchľovala a zlepšila analýzu *FMEA* v odvetví poľnohospodárskych strojov [9]. AI umožňuje nepretržité monitorovanie a automatizované

rozhodovanie o prioritách rizík, čím sa znižuje potreba manuálnych zásahov do procesu.

Využitie umelej inteligencie v analýze *FMEA* sa ukázalo ako efektívny nástroj na automatizáciu, zrýchlenie a zlepšenie presnosti hodnotenia rizík v rôznych odvetviach. Kombinácia *AI* s metódami ako *NLP*, strojové učenie, genetické algoritmy a neurónové siete ponúka inovatívne prístupy na predikciu a riadenie rizík.

## 2 HLAVNÉ VSTUPY POTREBNÉ PRE AI ANALÝZU FMEA

*AI* môže výrazne pomôcť s *FMEA* v rôznych fázach analýzy, čím zefektívni proces identifikácie a riešenia potenciálnych problémov. Vykonaná štúdia bola realizovaná vo výrobnej spoločnosti za účelom:

- *Automatická identifikácia rizík* - *AI* analyzuje historické dáta o poruchách a chybách, identifikuje vzory a navrhuje možné spôsoby zlyhania (*Failure Modes*). Model strojového učenia na základe minulých údajov predpovedá, ktoré procesy alebo komponenty majú vyššie riziko poruchy.
- *Predikcia pravdepodobnosti výskytu (Occurrence - O)* - *AI* hodnotí pravdepodobnosť výskytu chýb na základe veľkých datasetov zo senzorov, výrobných záznamov alebo údržby. Na základe zberu dát o vibrácií alebo teploty stroja predpovedá, kedy dôjde k poruche.
- *Automatické hodnotenie závažnosti (Severity - S)* - *AI* analyzuje dopad chyby pomocou simulácií alebo historických údajov. Dopad poruchy zariadenia na proces výroby, kvalitu, efektívnosť a priradenie závažnosti.
- *Detekcia chýb v reálnom čase (Detection - D)* - *AI* monitorovať výrobné linky a automaticky upozorní na anomálie skôr, ako spôsobia problém. Počítačové videnie odhaľuje výrobné chyby na základe obrazovej analýzy.
- *Automatizované vypočítanie RPN (Risk Priority Number)* - *AI* dynamicky prepočítava *RPN* a prioritizovať najkritickejšie problémy na základe aktuálnych údajov.
- *Návrhy na nápravné opatrenia* - *AI* odporučí kroky na zmiernenie rizika na základe historických údajov a najlepších postupov napr. návrh na výmenu komponentov skôr, ako dôjde k poruche.
- *Generovanie a automatizácia FMEA reportov* - *AI* automaticky generuje *FMEA* dokumentáciu a odporúčania na základe zistení a tvorba grafov, reportov a odporúčania pre manažérov kvality.
- *Integrácia do existujúcich ERP a MES systémov* - *AI* pracuje s podnikovým softvérom na získavanie aktuálnych údajov o výrobe a kvalite.

Pre potreby použitia *AI* je potrebné získať relevantné vstupy zo systému, ktoré umožnia automatickú identifikáciu rizík, výpočet *RPN* a návrh opatrení.

### 2.1 Historické dáta o poruchách a zlyhaniach

Identifikovať vzory a predikovať budúce zlyhania.

- zoznam porúch, chýb a zlyhaní (*Failure Mode*)
- príčina poruchy (*Root Cause*)
- dátum, čas a trvanie incidentu
- typ zariadenia, dielu alebo procesu, kde k chybe došlo
- frekvencia výskytu danej chyby.

*Výrobné a procesné dáta (MES/SCADA/ERP)* *AI* môže analyzovať aktuálne podmienky výroby a predikovať, kedy dôjde k chybe.

- parametre výrobných procesov (teplota, tlak, vibrácie, otáčky, atď.),
- údaje o výrobnej linke (číslo stroja, pracovný krok),
- miera chybovosti na linke,
- plánovaná vs. skutočná výroba.

*Kvalitatívne hodnotenia* (od odborníkov a operátorov *AI* môže analyzovať hodnotenia zamestnancov na identifikáciu rizík.

- skúsenosti operátorov s konkrétnymi chybami,
- hodnotenia pravdepodobnosti výskytu a detekcie chýb,
- návrhy na preventívne opatrenia.

*Dáta z údržby a opráv (CMMS - Computerized Maintenance Management System)* Prediktívna údržba založená na skutočnom stave zariadení.

- počet servisných zásahov na konkrétnom stroji,
- typy opráv a náklady na údržbu,
- predpokladaná životnosť komponentov.

*Predpisy, normy a limity kvality* *AI* môže porovnávať namerané hodnoty so štandardmi a určovať odchýlky.

- interné štandardy kvality,
- *ISO, IATF, FDA* a iné normy.

## 3 VÝSLEDKY ANALÝZY FMEA S PODPOROU AI

Implementácia *AI* podporovaného *FMEA* systému bola overená na reálnych dátach z výrobného prostredia. Dáta zahŕňali informácie o prevádzkových parametroch zariadení, histórii porúch a vykonaných údržbových zásahoch. Na základe týchto údajov bol natrénovaný model neurónovej siete v *TensorFlow* na predikciu hodnôt *RPN*. Výsledky ukázali, že model dokáže s vysokou presnosťou predikovať rizikové

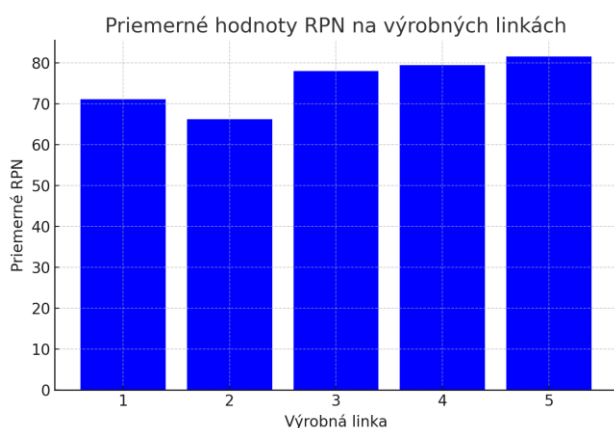
komponenty, čo umožňuje efektívnejšie plánovanie údržby a zníženie neplánovaných odstávok [12].

- automaticky vypočítať *RPN* (*Risk Priority Number*) na základe historických a aktuálnych dát ako je možné pozorovať na obr. 1,
- predikovať, ktoré poruchy majú najvyššiu pravdepodobnosť výskytu.
- odporučiť nápravné opatrenia na základe historických opráv a kvalitatívnych hodnotení.
- automaticky generovať *FMEA* tabuľku a reporty.
- upozorniť na kritické procesy a odporučiť plán údržby.

#### 4 ZHODNOTENIE

Integrácia umelej inteligencie do *FMEA* prináša nové možnosti v predikcii a riadení rizík. *AI* môže analyzovať veľké množstvo dát a identifikovať vzory, ktoré by inak mohli zostať nepovšimnuté. To umožňuje presnejšie predikcie porúch a efektívnejšie plánovanie údržby. Napríklad, algoritmy strojového učenia, ako sú *Random Forest*, *XGBoost* alebo neuronové siete implementované v *TensorFlow*, môžu byť použité na predikciu hodnôt *RPN* na základe historických dát.

Týmto spôsobom je možné identifikovať komponenty s vysokým rizikom zlyhania a prijať preventívne opatrenia na zníženie tohto rizika. Výsledky ukázali, že model dokáže s vysokou presnosťou predikovať rizikové komponenty, čo umožňuje efektívnejšie plánovanie údržby a zníženie neplánovaných odstávok [12].



Obr. 1. Výsledky detailnej analýzy rizík *RPN* na linkách (vlastné spracovanie)

#### ZÁVER

Integrácia umelej inteligencie do *FMEA* predstavuje významný krok vpred v oblasti údržby. Inteligentná *FMEA* umožňuje predikciu porúch a proaktívne riadenie rizík, čo vedie k zvýšeniu spoľahlivosti zariadení a zníženiu nákladov na údržbu. Implementácia takéhoto systému si vyžaduje investície do zberu dát a vývoja *AI* modelov, avšak

prínosy v podobe efektívnejšej údržby a vyššej produktivity tieto investície ospravedlňujú.

Tento článok predstavuje využitie veľkých jazykových modelov na rýchlu a odbornú tvorbu nových *FMEA* dokumentov pre kritické zariadenia. Empirická analýza ukazuje, že základné modely môžu správne generovať viac ako polovicu kľúčového obsahu *FMEA*. Výsledky z prieskumov medzi odborníkmi na spoľahlivosť ukazujú pozitívny pohľad na využitie generatívnej *AI* pri tvorbe týchto dokumentov.

#### Pod'akovanie

Táto práca bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-21-0308. Tento článok vznikol s podporou projektu VEGA 1/0150/24. Táto práca bola podporená agentúrou KEGA na základe zmluvy č. 017ŽU-4/2025.

#### LITERATÚRA

- [1] LYNCH, K. - LORENZI, F. - SHEEHAN, J. - KABAKCI-ZORLU, D. - ECK, B. (2024): *FMEA Builder: Expert Guided Text Generation for Equipment Maintenance*. In: Proceedings of the AI for Critical Infrastructure Workshop @ IJCAI-24, Jeju Island, Republic of Korea, 3 August.
- [2] KULKARNI, A. - TERPENNY, J. - PRABHU, V. (2023): *Leveraging Active Learning for Failure Mode Acquisition*. In: Sensors 23, 2818.
- [3] HEZLA, L. - GURINA, R. - HEZLA, M. - REZAEIAN, N. - NOHUROV, M. - AOUATI, S. (2024): *The Role of Artificial Intelligence in Improving Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) Efficiency in Construction Safety Management*. In: AI Technologies and Virtual Reality; Smart Innovation, Systems and Technologies; Springer: Singapore, Vol. 382, pp. 397-411.
- [4] NATANAEL, D. - SUTANTO, H. (2025): *Machine Learning Application Using Cost-Effective Components for Predictive Maintenance in Industry: A Tube Filling Machine Case Study*. Available online: <https://www.researchgate.net/publication/363935464> (accessed on 3 April).
- [5] MOHANTY, J. K. - DASH, P. R. - PRADHAN, P. K. (2020): *FMECA analysis and condition monitoring of critical equipments in super thermal power plant*. In: International Journal of Syst. Assur. Eng. Manag, Vol. 11, 583-599. <https://link.springer.com/article/10.1007/s13198-020-00945-4>
- [6] ZHANG, Y. - WANG, H. - LI, X. - LIU, Y. - ZHOU, Z. (2024): *FMEA-TSTM-NNGA: A Novel Optimization Framework Integrating Failure Mode and Effect Analysis, the Taguchi Method, a Neural*

*Network, and a Genetic Algorithm for Improving the Resistance in Dynamic Random-Access Memory Components.* In: *Mathematics*, Vol. 12, 2773.

[7] KUMAR, A. - SINGH, R. - SHARMA, A. (2022): *Automatic Failure Modes and Effects Analysis of an Electronic Fuel Injection Model.* In: *Applied Sciences*, Vol. 12, 6144. Available online: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/12/6144>

[8] KOWALSKI, K. - NOWAK, P. - WIŚNIEWSKI, P. (2023): *FMEA Model in Risk Analysis for the Implementation of AGV/AMR Robotic Technologies into the Internal Supply System of Enterprises.* In: *Risks*, Vol. 11, 172. Available online: <https://www.mdpi.com/2227-9091/11/10/172>

[9] CHEN, L. - ZHAO, J. - WANG, S. - LI, Q. (2020): *Enhancing Failure Mode and Effects Analysis Using Auto Machine Learning: A Case Study of the Agricultural Machinery Industry.* In: *Processes*, Vol. 8, 224. <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/2/224>.

[10] AWLIYA, G. - ASHFANIA, M. (2023): *Detection and Diagnostic with Random Forest and FMEA to Improve the Maintenance Management System in Steam Boiler of Power Plant.* In: *Proceedings of the PHM Society Conference.* Available online: <https://papers.phmsociety.org/index.php/phmap/article/view/3670>

[11] LYNCH, K. - LORENZI, F. - SHEEHAN, J. - KABAKCI-ZORLU, D. - ECK, B. (2024): *FMEA Builder: Expert Guided Text Generation for Equipment Maintenance.* In: *arXiv preprint arXiv:2411.05054.*

[12] BUBENÍK, P. - RAKYTA, M. - BUZALKA, M. - BIŇASOVÁ, V. - KOVARÍKOVÁ, Z. (2025): *Optimization of Business Processes Using Artificial Intelligence.* In: *Electronics*, Vol. 14, No. 11, pp. 2105, ISSN 2079-9292, <https://doi.org/10.3390/electronics14112105>

---

# Návrh kompaktnej dosky plošných spojov pre presné snímanie analógového vstupu

---

## Martin Bučko, Ing.

Katedra dopravnjej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: martin.bucko@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2257

## Vladimír Samaš, Ing.\*

Katedra dopravnjej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: vladimir.samas@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2257

## Patrik Slušňák, Ing.

Katedra dopravnjej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: patrik.slusnak@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2257

## Design of a Compact PCB for Accurate Analog Input Measurement

**Abstract:** The article deals with the design and implementation of a measurement system intended for accurate detection of linear displacement in the braking mechanism during brake lining testing. The measurement is carried out using the analogue sensor *Larm LS501*, whose output, due to the mechanical design, utilizes 40% of the available measurement range. The signal from the sensor is converted into digital form using a 16-bit *ADS1115* analogue-to-digital converter, which allows obtaining approximately 13,107 measurement increments over a total displacement of 400 mm. The resulting measurement resolution is approximately 0.0305 mm per increment. The system is controlled by an *ATmega328P* processing unit implemented as an Arduino Nano module, which provides data processing and communication via the *PC interface*. The electronic part is realized on a two-layer printed circuit board with dimensions of 90 × 45 mm, which, in addition to the processor and converter, includes power and filtering components, input connectors, and four additional analogue channels available in 10-bit resolution. The proposed solution provides a compact, easily serviceable, and cost-effective system for precise linear displacement measurement in a brake inertia test stand.

**Keywords:** Analog, *PC interface*, *ATmega328P*.

---

## ÚVOD

Presné meranie otočenia hriadeľa na skúšobnom brzdovom stave je mimoriadne dôležité a predstavuje kľúčový prvok pri testovaní brzdových obložení. Len spoľahlivé a presné snímanie uhla otočenia umožňuje objektívne vyhodnotiť správanie brzdového mechanizmu v rôznych prevádzkových podmienkach. Na tento účel je možné využiť senzor s analógovým výstupom, ktorý poskytuje niekoľko významných výhod. Analógový výstup umožňuje jednoduchšie a rýchlejšie monitorovanie meraných veličín a zároveň nevyžaduje použitie softvéru na spracovanie dát, čo predstavuje podstatný rozdiel oproti digitálnym systémom.

Z uvedeného dôvodu je pri meraní použité zariadenie typu *Larm LS501*, ktorého výstup má analógový charakter. Aby bolo možné s touto informáciou ďalej

pracovať v elektronickom systéme a vyhodnocovať ju pomocou riadiacej alebo meracej elektroniky, je nevyhnutné analógový signál konvertovať na digitálnu formu. Z tohto dôvodu je potrebné navrhnuť dosku plošných spojov, ktorá zabezpečí prevod meraného analógového signálu na digitálny výstup vhodný pre ďalšie spracovanie.

## 1 PROBLEMATIKA

Aktuálny merací systém využíva senzor *Larm LS501*, ktorého výstupom je analógový signál. Podľa technických parametrov senzora je jeho maximálne výstupné napätie pri napájaní zo zdroja [1] 42 V. V praktickej aplikácii sa však využíva len približne 40 % celého analógového rozsahu výstupu senzora, čo je spôsobené konštrukčným usporiadaním a geometriou brzdového mechanizmu, ktorý je so senzorom pevne

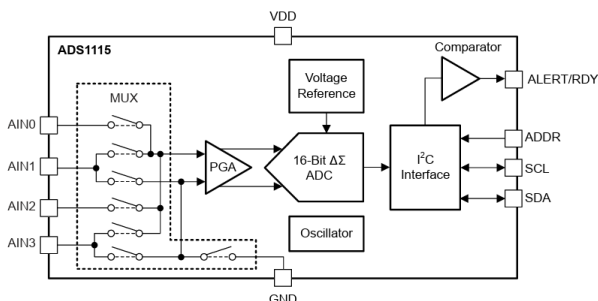
spojený. Na obr. 1 je zobrazený použitý snímač *Larm LS501*.



Obr. 1. Snímač *Larm LS501*

Systém meria posuv 400 mm a cieľom je dosiahnuť čo najvyššiu presnosť získaných údajov. Presnosť merania v prípade analógového snímača súvisí s parametrami použitého analógovo-digitálneho prevodníka (*ADC*), pričom rozlíšenie prevodníka priamo určuje počet dostupných inkrementov. V praxi sa používajú rôzne rozlíšenia *ADC*, napríklad 10-bit, 16-bit alebo 24-bit [2]. V tomto riešení je zvolené rozlíšenie 16 bitov, ktoré poskytuje celkový počet 32 767 hodnôt. Ide o šestnástu mocninu čísla dva mínus jedna, keďže jedna hodnota je vyhradená pre úroveň 0.

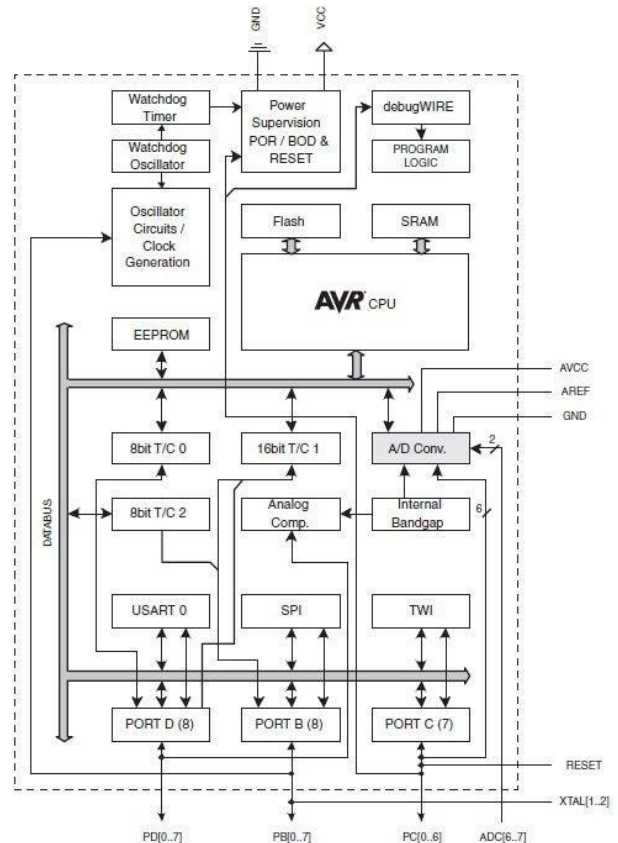
Ako vhodný *ADC* bol zvolený komponent *ADS1115*, ktorý je určený na meranie analógového signálu do 5 V [3]. Z tohto dôvodu je potrebné prispôbiť napájanie senzora tak, aby pracovné napätie neprekročilo 5 V. Bloková schéma zapojenia prevodníka *ADS1115* je znázornená na obr. 2.



Obr. 2. Bloková schéma *ADS1115*

Analógovo-digitálny prevodník nie je jediným prvkom systému. Súčasťou riešenia je aj procesor, v tomto prípade *ATmega328P*, ktorého výkonové

parametre sú dostatočné na dané použitie. Procesor podporuje komunikačný protokol *PC*, čo umožňuje jeho priame prepojenie s prevodníkom *ADS1115* a prenos meraných údajov bez potreby ďalších rozhraní. Alternatívnym riešením by bolo využitie výkonnejších mikrokontrolérov, napríklad z rady *STM32*. Na obr. 3 je znázornená schéma procesora *ATmega328P*.



Obr. 3. Bloková schéma *ATmega328p* [4]

## 2 VÝPOČET PRESNOSTI

### 2.1 Výpočet počtu inkrementov

Rozlíšenie *ADC* 16 bitov maximálny počet úrovní:

$$2^{16} - 1 = 32767. \quad (1)$$

Snímač však využíva len 40 % svojho rozsahu, preto počet využiteľných inkrementov:

$$32767 \cdot 0,40 = 13106,8 \approx 13107. \quad (2)$$

### 2.2 Výpočet dráhy

Celková meraná dráha je 400 mm, Hodnota 1 inkrementu:

$$n = \frac{400}{13106,8} = 0,03052 \text{ mm}. \quad (3)$$

To znamená, že posuv 400 mm je rozdelený na približne 13107 inkrementov a každý inkrement predstavuje 0,03 mm.

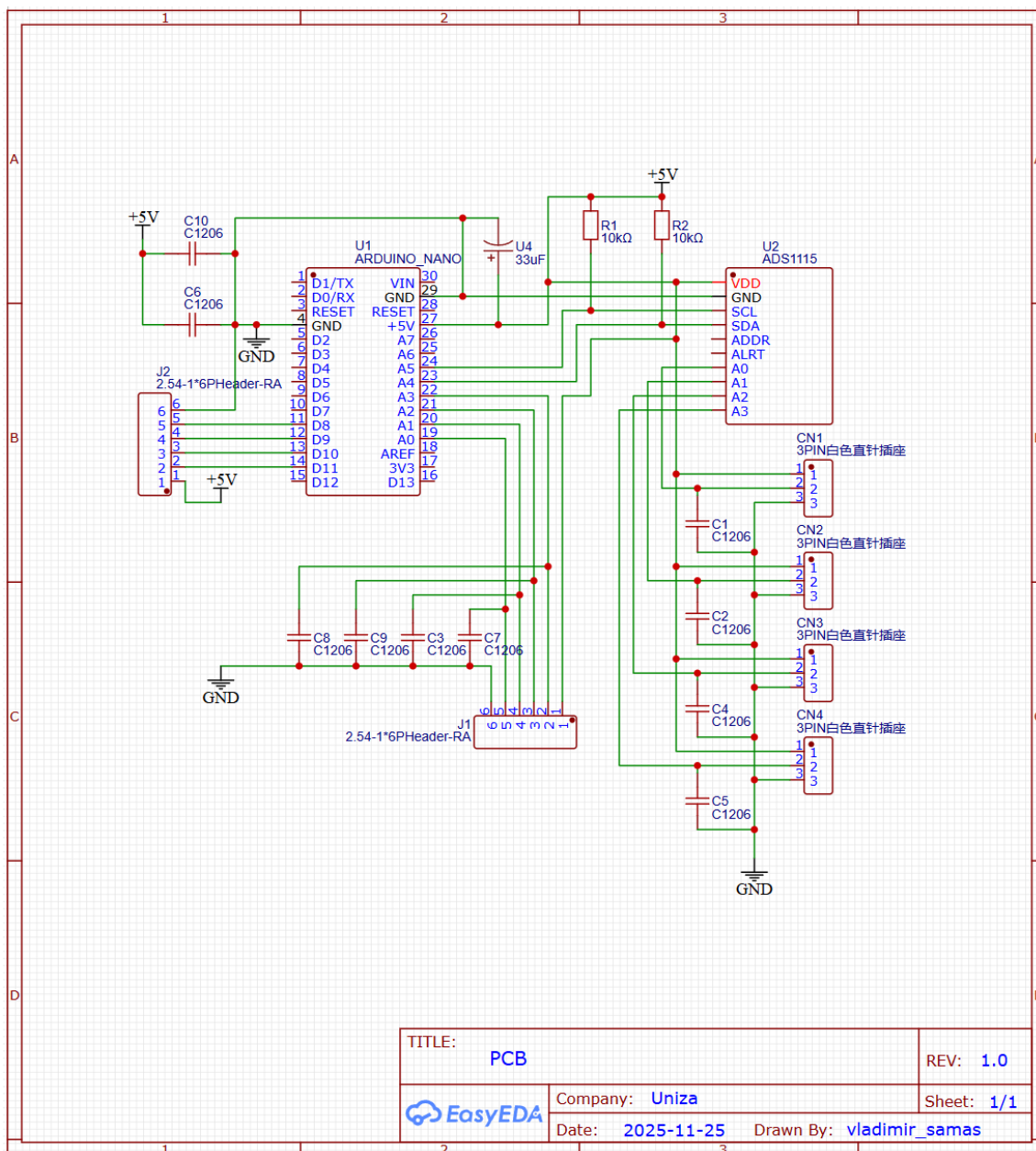
### 3 NÁVRH DOSKY PLOŠNÝCH SPOJOV

Doska plošných spojov využíva procesor *ATmega328P* vo forme modulu *Arduino Nano* [5]. Použitie externého procesora na samostatnej doske plošných spojov prináša viaceré výhody, medzi ktoré patrí jednoduchšia koncepcia návrhu, štandardizované pripojenie a najmä možnosť rýchlej výmeny procesorovej časti v prípade poruchy alebo potreby upgradu. Procesor *ATmega328P* je napájaný stabilizovaným napätím 5 V privádzaným priamo z *USB* konektora. Toto napätie je následne distribuované aj k senzoru a analógovo-digitálnemu prevodníku, ktorý pracuje na rovnakej úrovni napájania.

Rozmery dosky plošných spojov sú 90×45 mm. Ide o dvojvrstvovú *DPS* vyrábanú štandardnou technológiou s hrúbkou substrátu 1,6 mm. Systém je

navrhnutý tak, aby umožňoval meranie až štyroch analógových kanálov prostredníctvom konektorov *CN1* až *CN4*. Okrem toho je možné sledovať štyri ďalšie analógové signály priamo cez vstupné piny procesora *ATmega328P* v rozlíšení 10 bitov, konkrétne na vstupoch *A0* až *A3*.

Odpory *R1* a *R2* s hodnotou 10 kΩ slúžia ako pull-up rezistory pre komunikačný protokol *PC*, čím zabezpečujú správnu úroveň signálov na zbernici pri komunikácii medzi procesorom a prevodníkom *ADS1115*. *PC* je komunikačný protokol na prenos spracovaných údajov z lokálnych senzorov do jedného radiča. Komunikačný protokol *I2C* používa dve zbernice na pripojenie podriadených zariadení k zbernici, čo umožňuje hlavnému zariadeniu pingovať podriadené zariadenia podľa ich konkrétnej adresy [6].

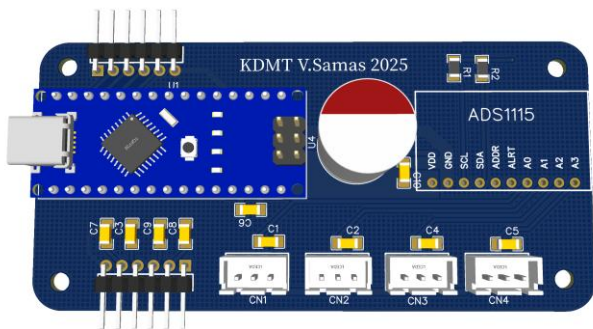


Obr. 4. 3D model dosky plošných spojov

V strede dosky plošných spojov je umiestnený hlavný elektrolytický kondenzátor, ktorý slúži na stabilizáciu napájania a elimináciu poklesov napätia pri dynamických zmenách odberu. Doska je navrhnutá tak, aby bol odpor medzi kondenzátorom a napájanými prvkami - procesorom *ATmega328P* a prevodníkom *ADS1115* - čo najnižší, čím sa zlepšuje filtrácia a znižuje rušenie.

Zemné prepojenie *DPS* je realizované formou mriežkovej medenej plochy, ktorá zabezpečuje kvalitné uzemnenie, znižuje parazitné impedancie a zároveň poskytuje lepšiu mechanickú fixáciu vodivých plôch k substrátu dosky. Na obr.4 je zobrazený 3D model navrhutej dosky plošných spojov.

Schéma dosky plošných spojov, na ktorej je znázornené zapojenie všetkých použitých komponentov vrátane procesora, prevodníka, napájacích vetiev a meracích vstupov, je uvedená na obr. 5. Schéma zobrazuje priradenie jednotlivých signálov k príslušným konektorom, prepojenie komunikačných liniek *PC*, napájacie rozvody a použitý filtrovací hardvér, ktoré spoločne tvoria funkčný elektronický celok meracieho systému.



Obr. 4. 3D model dosky plošných spojov

## ZÁVER

Navrhnutý merací systém predstavuje efektívne riešenie pre presné snímanie posuvu brzdového stavu pri testovaní brzdových obložení. Analógový senzor *Larm LS501* v kombinácii so 16-bitovým prevodníkom *ADS1115* umožňuje dosiahnuť vysoké rozlíšenie merania, ktoré pri využití meracieho rozsahu predstavuje približne 0,0305 mm na jeden inkrement. Takáto úroveň presnosti je dostatočná pre detailné vyhodnotenie dynamiky brzdového

mechanizmu počas skúšok. Použitie procesora *ATmega328P* vo forme modulu *Arduino Nano* prináša jednoduchú implementáciu, priaznivú cenu a možnosť rýchlej výmeny v prípade potreby.

Elektronická časť je realizovaná na dvojvrstvovej doske plošných spojov kompaktných rozmerov (90×45mm), ktorá integruje napájacie vetvy, filtre, komunikačné vstupy a štyri doplnkové analógové vstupy s 10-bitovým rozlíšením.

Výsledný systém je konštrukčne servisovateľný, ekonomicky výhodný a vhodný na ďalšie rozširovanie. Preukázalo sa, že predstavuje spoľahlivý základ pre presné meranie lineárneho posuvu v brzdovom zotrvačnickovom skúšobnom stave a môže byť ďalej využitý aj pri modernizácii.

## Pod'akovanie

*Táto publikácia vznikla vďaka podpore projektu KEGA 031ŽU-4/2023: Rozvoj kľúčových kompetencií absolventa študijného programu Vozidlá a motory.*

## LITERATÚRA

- [1] LARM (2015): *Lankový snímač LS501*. Dostupné na: [https://www.larm.cz/lankovy-snimac-ls501\\_files/](https://www.larm.cz/lankovy-snimac-ls501_files/)
- [2] ABOZEID, K. M. - ABOUDINA, M. M. - KHALIL, A. H. (2015): *8-bit 22nW SAR ADC using output offset cancellation technique*. In: 2015 11th International Computer Engineering Conference, (ICENCO), Cairo, pp. 76-79, <https://doi.org/10.1109/ICENCO.2015.7416328>.
- [3] LAPROVITTA, A. - PERETTI, G. - ROMERO, E. (2014): *Applying the analog configurability test approach in a wireless sensor network application*. In: Journal of Electrical and Computer Engineering, 3, <https://doi.org/10.1155/2014/309193>.
- [4] ULTRA LIBRARIAN (2025): *ATmega328p Pinout: Architecture and Application*. Dostupné na: <https://www.ultralibrarian.com/2023/03/16/atmega328p-pinout-architecture-and-application-ulc/>
- [5] ARDUINO UNO (2017): *Arduino*.
- [6] KALINSKY, D. - KALINSKY, R. (2001): Introduction to I2C. Embedded Syst Program, 14:1101–5.

---

# Overview of emerging technologies advancing Industry 4.0

---

## Vladimíra Biňasová, Ing., PhD., DiS.\*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: vladimira.binasova@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2727

## Branislav Mičieta, prof. Ing., PhD.

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: branislav.micieta@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2701

## Martin Gašo, doc. Ing., PhD.

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: martin.gaso@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2737

## Beáta Furmannová, doc. Ing., PhD.

Department of Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: beata.furmannova@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2711

**Abstract:** This paper summarizes the key technological pillars that define the concept of *Industry 4.0* (the fourth industrial revolution) and analyzes their transformative potential for modern manufacturing and industrial operations. *Industry 4.0* is characterized by the fusion of digital and physical technologies, leading to the creation of intelligent, fully connected and flexible manufacturing systems.

**Keywords:** Industry 4.0, new trends, industrial engineering.

---

## INTRODUCTION

Significant progress in nascent technologies like the *Industrial Internet of Things (IIoT)*, autonomous mobile robots, additive manufacturing techniques, industrial communication networks, and solutions empowered by artificial intelligence are propelling the evolution of industrial automation. The trends within the realm of *Industry 4.0* (Fig. 1) and the startup landscape, as presented in this document, represent only a preliminary overview of the patterns discerned through our comprehensive investigation. Other technologies, including but not limited to, volumetric visualization, distributed ledger technology, and cloud-based computational resources, are poised to fundamentally reshape the industry. Proactive identification of novel opportunities and the integration of emerging technologies into business operations at an early stage can substantially contribute to the establishment of a competitive edge.

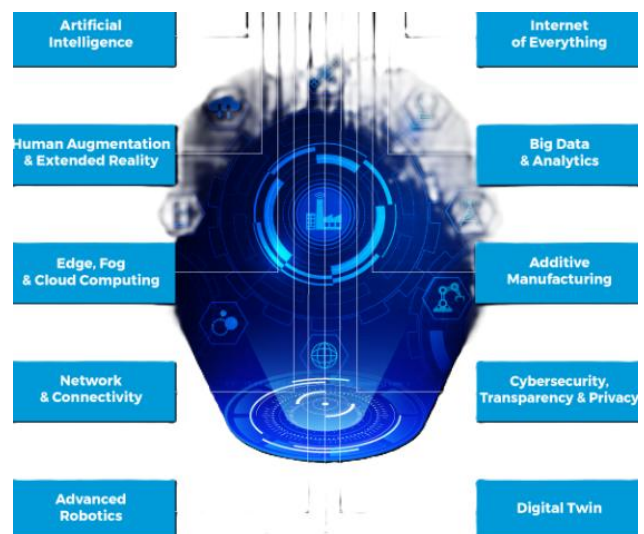


Fig. 1. The trends in *Industry 4.0* [6]

These digital representations provide crucial intelligence pertaining to each phase of the production

workflow. Moreover, digital twins enable the simulation of various scenarios and the refinement of processes without jeopardizing physical resources, thus fostering enhanced ingenuity and security.

## 1 THE IMPACT OF THE INDUSTRY 4.0 TECHNOLOGY TRENDS

A hierarchical visual representation highlights the ten most prominent Industry 4.0 trends projected to influence organizational operations by 2025. The integration of artificial intelligence methodologies across various technological assets and operational workflows constitutes the foremost trend within this industrial evolution. A growing number of innovative enterprises are engineering portable technological solutions specifically tailored for industrial environments, with the goal of enhancing occupational safety and optimizing manufacturing efficiency.

The acquisition of data through the implementation of both cloud-based and edge-based computational infrastructures, alongside the design and deployment of robust cybersecurity protocols, enables businesses to construct the foundational infrastructure required for the establishment of intelligent manufacturing facilities. Furthermore, sophisticated robotic technologies, encompassing autonomous mobile units, collaborative robots (cobots), and distributed robotic systems, as well as the advancement of robotic software development, represent a significant facet of the prevailing Industry 4.0 trends (Figure 2).

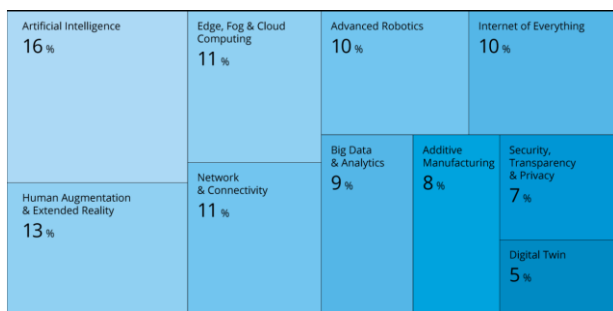


Fig. 2. The trends and innovations in Industry 4.0 [6]

*Artificial Intelligence (AI) and Machine Learning* are catalyzing advancements across various sectors and operational domains. The creation of specialized AI hardware and innovative algorithmic approaches is refining existing systems and providing solutions to complex manufacturing issues. Industrial facilities are increasingly integrating AI into their production workflows and systems. The emergence of sophisticated AI has facilitated developments such as predictive upkeep, cognitive computation, collective intelligence, context-aware processing, intelligent machinery, hardware acceleration, and generative design. These technologies are guiding manufacturing plants towards complete automation and unmanned operations. Effective supply network management is

now achievable, facilitated by AI-driven algorithms. These algorithms excel at anticipating requirements and automating stock control, thereby optimizing processes.

*ATG Artificial Intelligence Division* is an Italian startup, provides a solution for intelligent company 4.0. The startup's solution comprises three elements: prediction, predictive upkeep, and categorization of waste. The startup's prediction capability enables manufacturers to discern patterns and tendencies in industrial process information through the utilization of machine learning.

Moreover, the startup employs AI and the *Internet of Things (IoT)* to enable predictive maintenance of industrial resources. These elements allow manufacturers to foresee unforeseen energy usage surges and equipment malfunctions to diminish downtime and execute environmentally conscious measures. Its waste categorization solution also aids in averting quality concerns and pinpointing defect morphology.

*Oqton (AI-Powered Data Integration)* is a US-based startup, develops *FactoryOS*, an AI-enhanced platform for consolidating manufacturing system information to optimize factory production and yield. Machinery, systems, and information from manufacturing establishments are commonly maintained as discrete information repositories, rendering it challenging to extract tangible benefit from them. The cloud-based platform assimilates and leverages information from all phases of the industrial ecosystem, encompassing design, production, and the supply network. Progressively, the AI acquires knowledge continuously from these data inputs to generate crucial perspectives for enhancing overall efficiency.

*Human Augmentation & Extended Reality* are technological advancements are increasingly focused on enhancing human performance through human augmentation and *extended reality (XR)*. Wearable devices and exoskeletons, for example, are being deployed to improve both physical and cognitive functions. This represents a key development within the broader context of the Fourth Industrial Revolution. The increased availability of industrial mobile computing, user-friendly interfaces, and portable machine control solutions is facilitating wider adoption of these technologies [1].

*ULS Robotics (Exoskeleton Technology Platform)* is a nascent Chinese enterprise, is engaged in the creation of an exoskeleton technological infrastructure. A considerable segment of the manufacturing workforce experiences lassitude, enervation, and diverse forms of corporeal unease as a consequence of the recurrent and standardized nature of their occupational duties [1]. The deployment of exoskeletal devices in

manufacturing environments facilitates heightened operational efficacy among personnel, concurrently mitigating or precluding physical exertion. Generally, these exoskeletons furnish support for the lumbar region, the superior extremity (incorporating four degrees of kinematic freedom), and the inferior extremity (incorporating twelve degrees of kinematic freedom). [3]

Arkellis Technologies, an emerging Indian enterprise, provides a streamlined, low-code platform for constructing *industrial metaverse* environments. This platform facilitates the ready-made creation of augmented and virtual reality applications suitable for diverse commercial sectors. [4] The framework encompasses a suite of development instruments, catering to applications such as instruction, rectification, upkeep, visualization, and employee integration. By affording organizations the capability to incorporate comprehensive digital replicas with data synthesis, the framework expedites operational processes. Consequently, it curtails the duration required to introduce products to the market and obviates the need for costly, bespoke in-house product evolution. [5]

The substantial volume of data engendered by the industrial *Internet of Things (IIoT)* is driving the incorporation of *edge, fog, and cloud computing within Industry 4.0*. Bespoke hardware and software resolutions, including interconnected clouds, distributed cloud systems, distributed processing and storage, and hybrid computing models, are influencing this trajectory. Technological advancements such as low-code development interfaces, microservices architecture, portable computing, and multi-access edge computing are fostering the consolidation of edge, fog, and cloud computing across a range of industries. This stratified approach guarantees effective data management, ranging from immediate processing at the network periphery to comprehensive analysis in centralized cloud infrastructure.

*Network infrastructure and interconnectedness* represent key catalysts in facilitating the realization of *Industry 4.0*. Progress in technologies like edge-to-cloud computing, high-bandwidth time-synchronized networks, *low-power wide-area networking (LPWAN)*, *fifth-generation wireless (5G)*, and machine-to-machine (*M2M*) communication are prompting manufacturing facilities to embrace the *Industrial Internet of Things (IIoT)*, thereby converting them into advanced *Industry 4.0* sites [7].

These advancements are continuously improving interaction between equipment and personnel, as well as data conveyance. Developments in this domain are augmenting velocity, strengthening safeguards and efficacy, and diminishing network accessibility expenditures. The combination of diverse

connectivity options is fostering a unified, reactive, and versatile industrial milieu. This assimilation constitutes an essential element in the advancement of intelligent production facilities. Within the framework of the Fourth Industrial Revolution, the extensive acquisition of production information facilitates the evolution of industrial plants into sophisticated establishments. The inherent challenge associated with substantial datasets resides in their utility, which is contingent upon expedient and economical acquisition, storage, and scrutiny.

Progress in technology has enabled the exploitation of this information for penetrative evaluations of industrial processes. The accessibility of contemporaneous and immediate information has created avenues for prescriptive and predictive analysis across the hierarchical tiers of an organization's fabrication infrastructure. Furthermore, it equips enterprises with the capacity to utilize expansive volumes of information for strategic comprehension. These technologies methodically process and analyze information derived from diverse origins, *encompassing sensors, machinery, and platforms*, thereby providing a comprehensive perspective on operations and augmenting decisional processes and operational efficacy.

Driven by the imperative to develop novel technologies capable of satisfying escalating market requirements, industrial producers have increasingly adopted additive manufacturing methodologies. Initially employed as a rapid prototyping methodology, additive manufacturing is currently undergoing a transformative evolution, fostering the decentralization of production processes [6]. Hybrid manufacturing, which seeks to integrate *additive and subtractive techniques*, represents a key advancement in this domain.

Concurrent advancements in materials science and the refinement of techniques such as stereolithography and metal-based three-dimensional printing have significantly facilitated the construction of intricate geometries and constituent elements. *Additive manufacturing* is facilitating a transition towards highly customized and ecologically conscious cloud-distributed production models. Moreover, the synergistic incorporation of additive manufacturing with digital design paradigms and computational simulations serves to enhance dimensional accuracy and abbreviate product development cycles.

The inherent interconnectedness characteristic of *Industry 4.0* engenders a data exchange which prompts anxieties regarding safety, explicitness, and confidentiality. As production methodologies progress towards increased personalization and individualization, data administration protocols, both internal and external to the production environment, substantially impact an organization's desirability.

Robust protection of sensitive industrial information during transmission and processing is crucial to avert digital incursions targeting vital infrastructure. [8,9]

Improvements in *automated systems are accelerating*, improving, and securing operations within the fourth industrial revolution. Self-governing automated machines, cooperative automated machines, anthropomorphic automated machines, ambulatory automated machines, network-connected automated machines, application programming interfaces, object manipulation automated machines, and collectives of automated machines are prominent technological contributors influencing production.

In the realm of industrial production, contemporaneous interconnectedness constitutes the fundamental infrastructure of the *Internet of Everything (IoE)*. This pervasive connectivity extends across automated systems, operator interfaces, and interpersonal communication. It encompasses the *Industrial Internet of Things (IIoT)*, the interconnectedness of professional competencies, the network of service provisions, the integration of operational systems, and the comprehensive connectivity of the production facility.

*Digital twin technology* leverages the convergence of dynamic, real-time data acquisition and visual representation to construct virtual instantiations of industrial equipment. This approach demonstrates considerable potential across various applications, encompassing model-based engineering, simulated prototyping, simulated system verification, production rate maximization, and incremental improvement. The increasing integration of digital twins is propelling advanced manufacturing towards a highly automated paradigm.

### 3 CONCLUSIONS

The convergence of instantaneous information, automated reasoning, and human capabilities expedites fabrication procedures, resulting in enhanced efficacy and economic viability. A standardized architecture for the *Internet of Things (IoT)* and interoperability are indispensable for the effective deployment of *Industry 4.0*. Furthermore, *IoE* facilitates immediate observation and regulation of all integrated resources, leading to streamlined allocation and thereby optimizing the performance of manufacturing procedures.

### Acknowledgement

*This work was supported by project contract No. VEGA 1/0633/24 and by project contract No. KEGA 011ŽU-4/2025.*

### REFERENCES

- [1] ANTONIUK, I. - SVITEK, R. - KRAJČOVIČ, M. - FURMANNOVA, B. (2021): *Methodology of design and optimization of internal logistics in the concept of Industry 4.0*. In: Transportation Research Procedia, 55, 503-509.
- [2] Buckova, M., Gaso, M., Pekarcikova, M. Reverse BUCKOVA, M. - GASO, M. - PEKARCIKOVA, M. (2020): *Reverse logistic*. In: InvEnt 2020: Industrial engineering - Invention for enterprise - proceedings. Bielsko-Biala: Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humanistycznej.
- [3] BURGANOVA, N. - GRZNAR, P. - MOZOL, S. (2020): *Design of logistics system in production*. In: Technologie, procesy i systemy produkcyjne. Bielsko-Biala: Wydawnictwo naukowe Akademii techniczno-humanistycznej w Bielsku-Bialej, p. 11-18, ISBN 978-83-66249-56-1.
- [4] FILIPOVA, I. - DULINA, L. - BIGOSOVA, E. - PLINTA, D. (2021): *Modern Possibilities of Patient Transport Aids*. In: Transcom 2021. Virtual conference 26 May – 28 May, Slovakia. Transportation Research Procedia, 55, pp. 510-517.
- [5] SUKALOVA, V. - STOFKOVA, Z. - STOFKOVA, J. (2022): *Human Resource Management in Sustainable Development*. In: *Sustainability*, 14(21), 142.
- [6] BIŇASOVÁ, V. - MIČIETA, B. - KASAJOVÁ, M. - ZUZIK, J. (2025): *Progress in advanced industrial engineering*. In: *Technológ, Žilina*, UNIZA, Vol. 17, No. 2, pp. 91-94, ISSN 1337-8996, DOI 10.26552/tech. C.2025.2.18.
- [7] BUZALKA, M. - BUBENÍK, P. - DULINA, Ľ. (2025): *Applications of artificial intelligence in transport and logistics processes*. In: Invention for Enterprise, InvEnt, 16–18 June, Štrbské Pleso, 1. vyd., Bielsko-Biala, Poľsko: Fundacja Centrum Nowych Technologii, pp. 14-19, ISBN 978-83-947909-9-8,.
- [8] BUBENÍK, P. - RAKYTA, M. - BUZALKA, M. - BIŇASOVÁ, V. - KOVARÍKOVÁ, Z. (2025). *Optimization of Business Processes Using Artificial Intelligence*. In: *Electronics*, Vol. 14, No. 11, 2105.
- [9] MIČIETA, B. - HOWANIEC, H. - BIŇASOVÁ, V. - BUZALKA, M. (2025): *Financial performance analysis and indicator-based improvement strategies in a selected company*. In: European research studies journal. Piraeus (Grécko): International Strategic Management Association, Vol. 28, No. 3, pp. 482-499, ISSN 1108-2976, ISSN 3057-4331.

---

# Eigenanalysis of a valvetrain simplified model of a combustion engine with 3DOF

---

## Ján Dižo, doc. Ing., PhD.\*

Department of Transport and Handling Machines, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina, Slovakia.  
E-mail: jan.dizo@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2560

## Miroslav Blatnický, doc. Ing., PhD.

Department of Transport and Handling Machines, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Žilina,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina, Slovakia.  
E-mail: miroslav.blatnicky@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2659

## Tadeusz Dziubak, Prof., DSc., DEng.

Faculty of Mechanical Engineering,  
Military University of Technology, Warsaw, Poland,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: tadeusz.dziubak@wat.edu.pl, Tel.: +48 26 183 71 21

**Abstract:** A valvetrain is a necessary structural unit of every combustion engine with discontinued combustion process. It ensures changing cylinder filling, allow low level of exhaust emissions and an optimal combustion process. There are several types of valvetrains depending on their design solution. In principle, there are recognized older valvetrain systems marked as *OHV* (*overhead valve engine*) and *OHC* (*overhead camshaft engine*). Regardless of a type of valvetrain, they include several components, which are in mutual connection. As they are exposed to dynamic effect during operational conditions, they should have suitable dynamical properties. A valvetrain is a mechanical system. The essential dynamical properties of a mechanical system of a valvetrain of a combustion engine include eigenfrequencies and eigenmodes. The article is focused on eigen analysis of a valvetrain of a combustion engine. Equations of motion of a simplified dynamical model of a valvetrain are derived. Eigen characteristics of a chosen type of a valvetrain are calculated. *Matlab* software and *Simpack* multibody software were used for calculation of the derived equations.

**Keywords:** valvetrain, combustion engine, eigen analysis, equations of motion.

---

## INTRODUCTION

A valvetrain of a combustion engine serves to change cylinder filling. A process of changing cylinder filling, it means, exhaust gas discharge from the combustion chamber and compress space as well as fresh filling supply should be ongoing in exactly defined time intervals regarding to a cylinder position (valvetrain timing) [2, 10].

Valvetrains are mainly installed in four-stroke combustion engines. The most widely used valvetrains in combustion engines are the valvetrains types *OHV*, i.e. overhead valve engine and *OHC*, i.e. overhead camshaft engine. In case of combustion engines with larger dimensions, the *OHV* system is usually applied (Fig. 1). It is because such engines have divided engine head due to design reasons and a camshaft cannot be located [4-6]. The *OHC* valvetrain does not include a push rod, therefore it is stiffer and lighter in comparison with the *OHV* valvetrain. This is its advantage for high-speed

engines. From a combustion chamber point of view, both types of valvetrains equivalent, because valves are located in the same way [1].



Fig. 1. An example of the *OHV* valvetrain [1]

On the other hand, the *OHC* valvetrain includes a camshaft located in an engine head, which leads to

problem to install additional components into it. In principle, two types of *OHC* valvetrain are used in a practice. The *DOHC* (or  $2 \times OHC$ ) valvetrain is recognized as a *dual overhead camshaft* (Fig. 2), which includes two camshafts in the engine head. The other type is the *SOHC* valvetrain as a *single overhead camshaft*, which includes only one camshaft in the engine head (Fig. 3) [7-9].

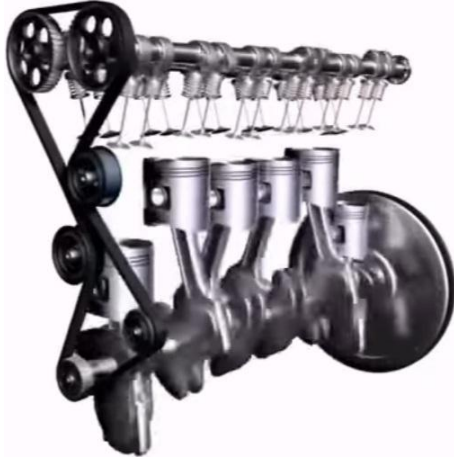


Fig. 2. An example of the *DOHC* valvetrain [1]



Fig. 3. An example of the *SOHC* valvetrain [1]

## 1 EIGEN ANALYSIS OF A VALVETRAIN

A problem of free oscillation is applied for calculation of eigen frequencies of a valvetrain. They characterized the dynamical properties and oscillation characteristics of a valvetrain in a significant way. Eigen frequencies of a valve train should be as high as possible. This is achieved by a choice of suitable parameters during its design process. The parameters are such as material, stiffnesses, masses and others. Considering that a valvetrain is a complicated oscillating mechanical system, which composes of elements with a character of continuum, it has in the reality infinitely many eigenfrequencies. Therefore, a method for discretization of continuum is applied for eigenanalysis. There is accepted a rule to achieve a sufficient calculation accuracy, that number of discrete masses should be at least twice as high as the number of eigen frequencies. Free oscillation of a

valvetrain should be investigated in such a position of a mechanism, in which a valve is open. It means, that clearance between individual components of a valvetrain does not exist. Damping is not considered usually, which partially simplifies a dynamical model of a valvetrain.

The research was solved in two software, namely in *Matlab* and in a multibody software *Simpack*. The results obtained from these software are compared.

Figure 4a depicts a simplified dynamical model of a valvetrain for one cylinder. It includes three masses with elastic couplings between them. Figure 4b shows a multibody model of the considered simplified valvetrain created in the *Simpack* multibody system.

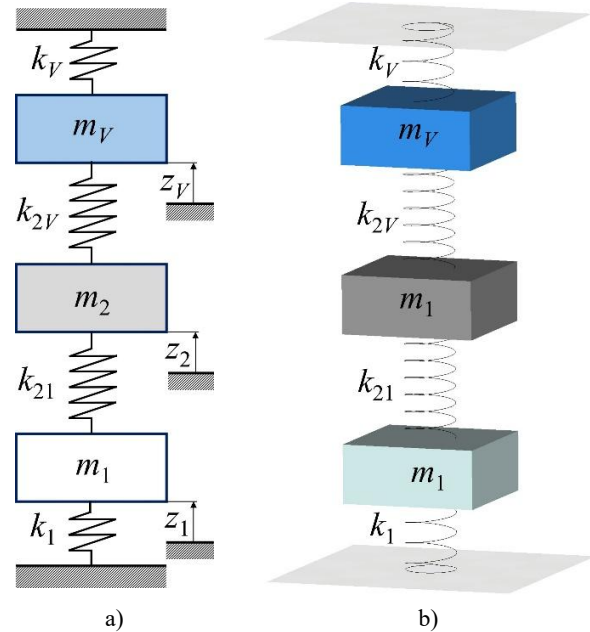


Fig. 4. a) A simplified dynamical model of the solved mechanical system of the valvetrain, b) a multibody model in the *Simpack* software

As it can be seen, the considered mechanical system has three degrees of freedom (3 *DOF*) with considered generalized coordinates  $x_1$ ,  $x_2$  and  $x_V$ . The equations of motion are derived by means of the method of the *Lagrange's* equations of the second kind, which have the general form for undamped non-forced oscillation as follows [3, 11]:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial E_K}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial E_K}{\partial q_i} + \frac{\partial E_P}{\partial q_i} = 0, \quad (1)$$

where  $E_K$  is kinetic energy,

$E_P$  is potential energy,

$q_i$ ,  $\dot{q}_i$  are generalized velocities and deflections, respectively.

Kinetic energy  $E_K$  of the valvetrain simplified mechanical system with 3 *DOF* is:

$$E_K = \frac{1}{2} \cdot (m_V \cdot \dot{z}_V^2 + m_2 \cdot \dot{z}_2^2 + m_1 \cdot \dot{z}_1^2), \quad (2)$$

potential energy  $E_P$  is:

$$E_P = \frac{1}{2} \cdot \left( k_V \cdot z_V^2 + k_{2V} \cdot (z_1 - z_V)^2 + k_{21} \cdot (z_1 - z_2)^2 + k_1 \cdot z_1^2 \right), \quad (3)$$

where  $k_V$ ,  $k_{2V}$ ,  $k_{21}$ ,  $k_1$  are stiffnesses of elastic components in the system, respectively.

Kinetic end potential energies are derived based on the equation (1). Then, the resulting equations of motion are as follows:

$$\begin{aligned} m_V \cdot \ddot{z}_V + (k_V + k_{2V}) \cdot z_V - k_{2V} \cdot z_2 &= 0 \\ m_2 \cdot \ddot{z}_2 + (k_{2V} + k_{21}) \cdot z_2 - k_{21} \cdot z_1 - k_{2V} \cdot z_V &= 0, \\ m_1 \cdot \ddot{z}_1 + (k_{21} + k_1) \cdot z_1 - k_{21} \cdot z_2 &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

or in a matrix form:

$$\begin{bmatrix} m_V & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{z}_V \\ \ddot{z}_2 \\ \ddot{z}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_V + k_{2V} & -k_{2V} & 0 \\ -k_{2V} & k_{2V} + k_{21} & -k_{21} \\ 0 & -k_{21} & k_{21} + k_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} z_V \\ z_2 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

The solution of the resulting system of equations of motion is considered in a form:

$$\begin{aligned} z_V &= z_{V0} \cdot e^{i\Omega t} \\ z_2 &= z_{20} \cdot e^{i\Omega t}, \\ z_1 &= z_{10} \cdot e^{i\Omega t} \end{aligned} \quad (6)$$

where  $z_V$ ,  $z_{20}$  and  $z_{10}$  are amplitudes of eigenvectors of individual masses on the mechanical system of the simplified valvetrain shown in Fig. 4, respectively,

$\Omega$  is eigenfrequency of the system,  
 $t$  is time.

When the supposed solution is substituted to the equations of motion (eq. 4), the following system of algebraic equations is get:

$$\begin{aligned} (k_V + k_{2V} - \Omega^2 \cdot m_V) \cdot z_{V0} - k_{2V} \cdot z_{20} &= 0 \\ -k_{21} \cdot z_{10} + (k_{2V} + k_{21} - \Omega^2 \cdot m_2) \cdot z_{20} - k_{2V} \cdot z_{V0} &= 0, \\ -k_{21} \cdot z_2 + (k_{21} + k_1 - \Omega^2 \cdot m_1) \cdot z_{10} &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Their matrix form is as follows:

$$\begin{bmatrix} k_V + k_{2V} - \Omega^2 \cdot m_V & -k_{2V} & 0 \\ -k_{2V} & k_{2V} + k_{21} - \Omega^2 \cdot m_2 & -k_{21} \\ 0 & -k_{21} & k_{21} + k_1 - \Omega^2 \cdot m_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} z_{V0} \\ z_{20} \\ z_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

This system of algebraic equations has a non-trivial solution, when a determinant of the system equals to zero. It can be written as follows:

$$D = \begin{bmatrix} k_V + k_{2V} - \Omega^2 \cdot m_V & -k_{2V} & 0 \\ -k_{2V} & k_{2V} + k_{21} - \Omega^2 \cdot m_2 & -k_{21} \\ 0 & -k_{21} & k_{21} + k_1 - \Omega^2 \cdot m_1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

Lets return to the equations of motion in the matrix form, i.e. to the eq. (5). This equation can be written in a shorter form as follows:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{z}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{z} = \mathbf{0}, \quad (10)$$

where  $\mathbf{M}$  is mass matrix,

$\mathbf{K}$  is stiffness matrix,

$\mathbf{z}$ ,  $\dot{\mathbf{z}}$ ,  $\mathbf{0}$  are vectors of generalized coordinates, generalized velocities and vector of the right side, respectively.

When the eq. 10 is multiplied form the left side by the inverse matrix to the mass matrix  $\mathbf{M}^{-1}$ , we get the following equation:

$$\mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{z}} + \mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{z} = \mathbf{0}. \quad (11)$$

Further, we consider a solution of the system of equations of motion (eq. 10) in this form:

$$\mathbf{z} = \mathbf{z}_i \cdot e^{i\Omega t}, \quad (12)$$

where  $\mathbf{z}_i$  is a vector of amplitudes, i.e.

$$\mathbf{z}_i = [z_V, z_2, z_1]^T.$$

After substituting the solution (eq. 12) and its modification, we get the following equation:

$$\mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{K} + \Omega^2 \cdot \mathbf{E} = \mathbf{0}, \quad (13)$$

where  $\Omega^2$  is a square of eigenfrequencies,

$\mathbf{E}$  is the identity matrix.

Now, we can apply a known mathematical approach to the solution. It means, that calculation of eigenfrequencies and eigenmodes is transmitted to calculation of eigenvalues and eigenvectors of the matrix  $\mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{K}$ .

The following parameters of the valvetrain system are considered:  $m_V = 0.47$  kg,  $m_2 = 0.0054$  kg,  $m_1 = 0.022$  kg,  $k_V = 100 \cdot 10^6$  N·m<sup>-1</sup>,  $k_{2V} = 1000 \cdot 10^6$  N·m<sup>-1</sup>,  $k_{21} = 100 \cdot 10^6$  N·m<sup>-1</sup>,  $k_1 = 120 \cdot 10^6$  N·m<sup>-1</sup>. The task is to calculate eigenfrequencies and eigenmodes of this system. The calculation comes from the derived mathematical model represented by the equation of motion (eq. 4 or eq. 5). The calculation was performed by means of the *Matlab* software. The used calculation script for the task is presented in Appendix.

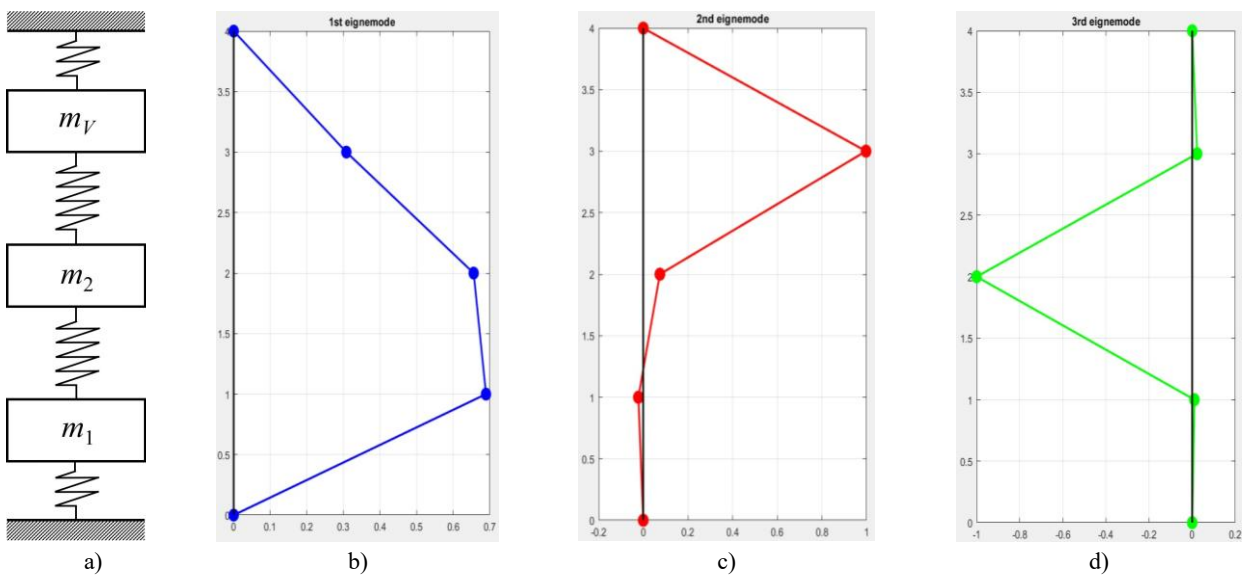
The resulting eigenfrequencies form the *Matlab* software as well as form the *Simpack* software are listed in Tab. 1. The results for both software are very similar, only minimal deviations are detected. Therefore, it can be stated, that calculations of eigenfrequencies in the *Matlab* software and in the *Simpack* software are the same.

Further, eigenmodes are illustrated in Fig. 5. They are  
**Tab. 1.** The resulting eigenfrequencies achieved from the *Matlab* and *Simpack* software

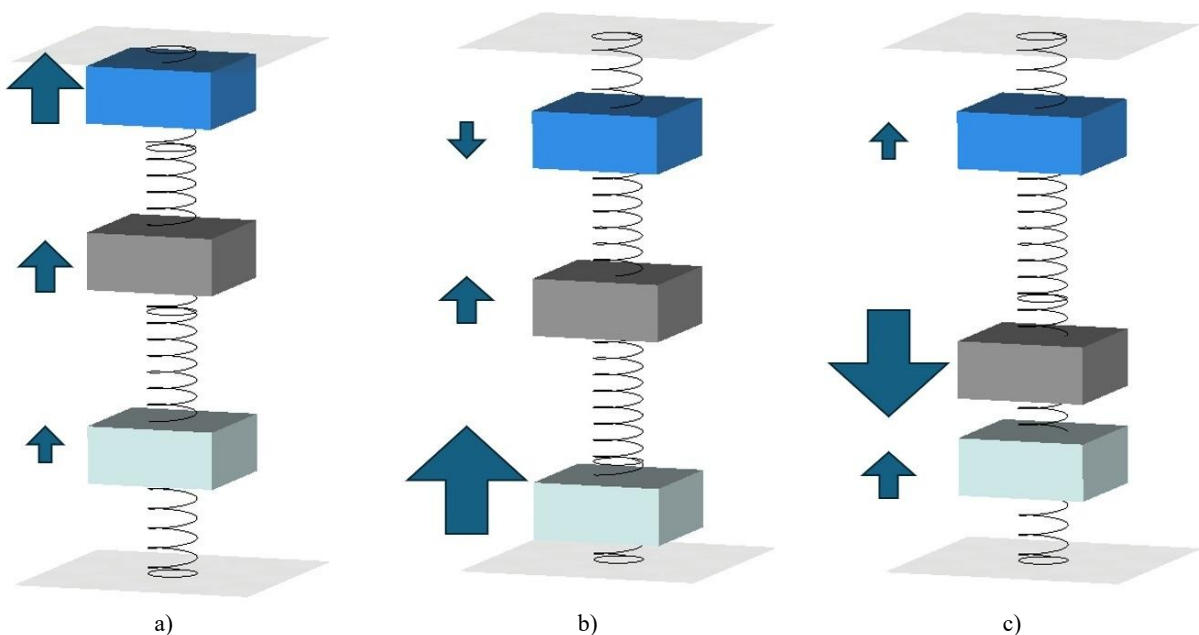
	Eigenfrequencies $f$ [Hz]		Angular eigenfrequencies $\Omega$ [rad·s <sup>-1</sup> ]	
	<i>Matlab</i>	<i>Simpack</i>	<i>Matlab</i>	<i>Simpack</i>
1 <sup>st</sup> eigenmode	$2.832 \cdot 10^3$	$2.83225 \cdot 10^3$	$1.780 \cdot 10^4$	$17.7956 \cdot 10^3$
2 <sup>nd</sup> eigenmode	$15.643 \cdot 10^3$	$15.6429 \cdot 10^3$	$9.829 \cdot 10^4$	$98.2874 \cdot 10^3$
3 <sup>rd</sup> eigenmode	$72.248 \cdot 10^3$	$72.2478 \cdot 10^3$	$45.395 \cdot 10^4$	$453.946 \cdot 10^3$

**Tab. 2.** Calculated values of eigenmodes amplitudes for individual bodies of the valvetrain mechanical system

	$m_V$	$m_2$	$m_1$
1 <sup>st</sup> eigenmode	0.6894	0.6557	0.3078
2 <sup>nd</sup> eigenmode	-0.0217	0.0745	0.9970
3 <sup>rd</sup> eigenmode	0.0104	-0.9997	0.0232



**Fig. 5.** Illustration of eigenmodes calculated in the *Matlab* software: a) an original mechanical system in an equilibrium position, b) the 1st eigenmode, c) the 2nd eigenmode, d) the 3rd eigenmode



**Fig. 6.** Illustration of eigenmodes calculated in the *Simpack* software: a) the 1st eigenmode, b) the 2nd eigenmode, c) the 3rd eigenmode

obtained from the *Matlab* software. As it can be seen, the 1<sup>st</sup> eigenmodes is without a node, the 2<sup>nd</sup> eigenmode has one node and the 3<sup>rd</sup> eigenmode has two nodes. It means, that the mechanical system is in these nodes without movement during oscillation. Further, we can see, that in the 1<sup>st</sup> eigenmode, the mass  $m_1$  has the biggest deflection, in the 2<sup>nd</sup> eigenmode, the mass  $m_V$  has the biggest deflections and for the 3<sup>rd</sup> eigenmode, the mass  $m_2$  has the biggest deflection. The source commands for creating eigenmodes are written in Appendix.

Figure 6 also shows the eigenmodes of the solved mechanical system of the valvetrain, but they are calculated the *Simpack* software. As it can be seen, they also correspond to the previously calculated eigenmodes.

## CONCLUSION

The main goal of the presented research was to calculate the essential dynamical properties of a simplified model of a valvetrain of a combustion engine. Equations of motion were derived by means of the *Lagrange's* equations of the second kind. These equations were written in a matrix form and based on the obtained matrices, the eigenmodes and eigenfrequencies were calculated. A multibody model of the solved mechanical system was created in the *Simpack* software. It served for calculation the same dynamical characteristics, i.e. eigenmodes and eigenfrequencies. The resulting numerical values of the eigenfrequencies showed, that both results are very similar. The graphical eigenmodes are also included in the results. The source commands for the *Matlab* software are included in Appendix of the article.

## APPENDIX

Source of commands for calculation of *eigenfrequencies* and *eigenmodes* in the *Matlab* software:

```
%% eigenanalysis of valvetrain:
```

```
clear all
clc
```

```
% input parameters:
```

```
mv=0.47;
m2=0.0054;
m1=0.022;
kV=100*10^6;
k2V=1000*10^6;
k21=100*10^6;
k1=120*10^6;
```

```
% mass matrix:
```

```
M=[mv,0,0;0,m2,0;0,0,m1];
```

```
% stiffness matrix:
```

```
K=[kV+k2V,-k2V,0;-k2V,k2V+k21,-k21;0,-k21,k21+k1];
```

```
% inverse mass matrix:
```

```
MI=inv(M);
```

```
% calculation of eigenvalues and eigenmodes:
```

```
[V,D]=eig(MI*K); % V - eigenvectors, D - eigenvalues (spectral matrix)
```

```
Omega_square=sort([D(1,1);D(2,2);D(3,3)], 'ascend');
```

```
% angular eigenfrequency:
```

```
Omega=sqrt(Omega_square); % [rad/s]
```

```
% eigenfrequency:
```

```
f=Omega/(2*pi); % [Hz]
```

Source of commands for creating *eigenmodes* in the *Matlab* software:

```
a1=V(:,2); % 1st eigenmode
```

```
a2=V(:,3); % 2nd eigenmode
```

```
a3=V(:,1); % 3rd eigenmode
```

```
y=0:1:4;
```

```
r=[0,0];
```

```
s=[0,4];
```

```
x1=[0,a1',0];
```

```
x2=[0,a2',0];
```

```
x3=[0,a3',0];
```

```
% 1st eigenmode - graph
```

```
figure(1)
```

```
plot(x1,y,'-ob',r,s,'k','LineWidth',2,'MarkerEdgeColor','b','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',10)
```

```
title('1st eigenmode')
```

```
grid
```

```
% 2nd eigenmode - graph
```

```
figure(2)
```

```
plot(x2,y,'-or',r,s,'k','LineWidth',2,'MarkerEdgeColor','r','MarkerFaceColor','r','MarkerSize',10)
```

```
title('2nd eigenmode')
```

```
grid
```

```
% 3rd eigenmode - graph
```

```
figure(3)
```

```
plot(x3,y,'-og',r,s,'k','LineWidth',2,'MarkerEdgeColor','g','MarkerFaceColor','g','MarkerSize',10)
```

```
title('3rd eigenmode')
```

```
grid
```

## Acknowledgement

*This publication was supported by the project KEGA 031ŽU-4/2023: Development of key competencies of*

the graduate of the study program *Vehicles and Engines*.

## REFERENCES

- [1] TECHNOLOGIX (2025): *Types of Engine valve trains*. Available online: <https://www.youtube.com/shorts/iNsBvMHklRM>
- [2] ISTENÍK, R. - KUKUČA, P. (2008): *Valvetrains and non-conventional mechanisms of combustion engines* (in Slovak). Žilina: Georg, ISBN 978-8089-4010-00.
- [3] FILO, M. - LUKÁČ, M. (2005): *Computer aided modelling and simulations* (in Slovak). EDIS - University of Žilina, ISBN 80-8070-466-X.
- [4] WANG, Y. (2006): *Introduction to Engine Valvetrains R-339. Power and Propulsion Materials and Manufacturing*. SAE International, 608 pages.
- [5] STONE, R. (1992): *Intorduction to Internal Combustion Engines*. MacMillan, ISBN 0-333-55083-8.
- [6] SMITH, P. H - WENNER, D. H. (1954): *The Design and Tuning of Competition Engines*. Bentley Robert Inc., ISBN 08-3760-1401.
- [7] HANSEN, Z. (2023): *Internal Combustion Engine Fundamentals*. NY Research PR, ISBN 164-725-4264.
- [8] HEYWOOD, J. B. (2018): *Internal Combustion Engine Fundamentals*. 2nd edition, McGraw-Hill Education, 1056 pages, code 439070221.
- [9] HEYWOOD, J. B. (2020): *Internal Combustion Engines. Applied Thermosciences*. 4th edition, John Wiley and Sons Ltd, 656 pages, ISBN 978-1119-4545-02.
- [10] HLAVŇA, V. - KUKUČA, P. - ISTENÍK, R. - LABUDA, R. - LIŠČÁK, Š. (2007) *A transport mean - its engine* (in Slovak). University of Žilina, 466 pages, ISBN 80-8070-6623.
- [11] DIŽO, J. - BLATNICKÝ, M. (2019): *Mechanics of vehicles and machines, part 1* (in Slovak). University of Žilina, ISBN 978-80-554-1625-0.

---

# Porovnanie optimalizačných algoritmov pri spektrálnom ladení mechanickej sústavy

---

## Jaroslav Majko, Ing., PhD.

Katedra aplikovanej mechaniky, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: jaroslav.majko@fstroj.uniza.sk

## Lucia Deganová, Ing.

Katedra aplikovanej mechaniky, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: lucia.deganova@fstroj.uniza.sk

## Ondrej Piroh, Ing.

Katedra aplikovanej mechaniky, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: ondrej.piroh@fstroj.uniza.sk

## Ján Minárik, Ing.\*

Katedra aplikovanej mechaniky, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: jan.minarik@fstroj.uniza.sk

## Comparison of optimisation algorithms during the spectral tuning of a mechanical system

**Abstract:** This article deals with a comparison of various, gradient-based optimisation algorithms in terms of their accuracy and effectivity. The compared algorithms are the *steepest descent method (SDM)* and the most well-know *quasi-Newton* methods. The presented methods were applied to the spectral tuning of a simple two degree of freedom (*DOF*) mechanism, in order to evaluate their performance. The obtained results were statistically processed and utilised to compare the algorithms, based on their accuracy and overall effectivity. The results show that the quasi-Newton methods are superior to the *SDM* in terms of both the accuracy and computing time. Moreover, the overall performance of these methods is also significantly less influenced by the selection of starting point. Thus, the obtained results render the quasi-Newton methods as a significantly better choice, compared to the standard *SDM*.

**Keywords:** optimisation, *quasi-Newton* methods, natural frequencies, *Matlab*.

---

## ÚVOD

Stroje a zariadenia sú počas prevádzky vystavené zaťaženiám, ktoré môžu vzniknúť buď v dôsledku chodu zariadenia alebo môžu predstavovať vplyvy okolia. Tieto zaťaženia môžu mať navyše aj stochastický charakter. Najmä pri dynamickom zaťažení je kľúčové poznať charakter pôsobiacich síl, keďže zásadným spôsobom ovplyvňujú funkciu zariadení. Významným parametrom sú práve frekvencie zaťaženia, ktoré vo veľkej miere ovplyvňujú prevádzku, životnosť a spoľahlivosť

strojov a konštrukcií. Z hľadiska vlastných frekvencií je mimoriadne nebezpečný stav rezonancie, keď sú budiace frekvencie príliš blízke vlastnej frekvencii stroja, čo môže v extrémnych prípadoch viesť až k úplnej deštrukcii zariadenia. Z tohto dôvodu je preto dôležité vhodné nastavenie parametrov konštrukcie tak, aby jej vlastné frekvencie neinterferovali s frekvenciami budiacich síl [1, 2].

Jednou z možných metód, ako modifikovať vlastné frekvencie sústavy je použitie optimalizačných algoritmov. Pomocou procesu optimalizácie je možné

nastaviť parametre systému tak, aby sa jeho vlastné frekvencie v dostatočnej miere približovali tým požadovaným [3]. V prípade inžinierskych aplikácií je jedným z najčastejšie využívaných algoritmov modifikovaný Simplex, známy tiež ako algoritmus *Nelder-Mead*. Jedná sa o pomerne jednoduchý, efektívny a robustný algoritmus, schopný nájsť lokálne minimum cieľovej funkcie. Existuje tiež skupina algoritmov využívajúcich hlbšie matematické základy. Tieto algoritmy sú založené na výpočte, resp. aproximáciách gradientu cieľovej funkcie. Cieľová funkcia predstavuje matematický popis riešenej úlohy, pričom bod, v ktorom táto funkcia nadobúda minimum zodpovedá optimálnemu stavu, ktorého dosiahnutie je predmetom optimalizácie. Medzi základné prístupy tu patrí napr. metóda najväčšieho spádu (*SDM*), ktorá využíva numerický výpočet gradientu v príslušnom bode cieľovej funkcie, v ktorého smere je následne hľadané nové lokálne minimum. Avšak, v komplexných aplikáciách, ako napríklad *metóda konečných prvkov (MKP)*, môže byť výpočet gradientu veľmi neefektívny, pričom navyše môžu mať tieto algoritmy problém s konvergenciou, keďže presnosť smeru určeného gradientom je obmedzená len na blízke okolie derivovaného bodu [2].

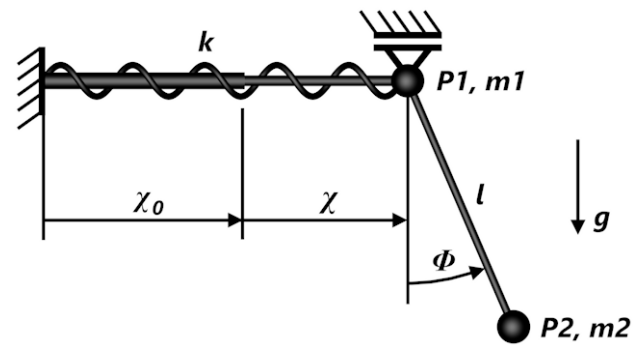
Za účelom urýchlenia konvergenzie bola postupne vyvinutá skupina modifikovaných algoritmov, ktoré sú známe aj ako quasi-Newtonove metódy. Medzi tie najznámejšie patria algoritmy *Davidon-Fletcher-Powell (DFP)* a *Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS)*. Tieto metódy predstavujú modifikáciu *SDM*, ktorá využíva aproximácie inverzie *Hessovej matice (Hessiánu)*, t.j. matice druhých parciálnych derivácií cieľovej funkcie, ktorá je počítaná v každom iteračnom kroku. Inverzia Hessiánu potom slúži na spresnenie smeru vypočítaného gradientu. Tento prístup spravidla vedie k výraznému urýchleniu konvergenzie [2, 4, 5].

Táto práca sa zaoberá porovnaním efektivity metódy *SDM* a *quasi-Newtonových* algoritmov, špecificky metód *DFP* a *BFGS*. Tieto algoritmy boli aplikované pri optimalizácii vlastných frekvencií jednoduchého mechanizmu s dvoma stupňami voľnosti ( $^{\circ}V$ ), ktorý bol modelovaný ako sústava hmotných bodov. Cieľom optimalizácie bolo dosiahnuť požadované vlastné frekvencie mechanizmu, s ohľadom na obmedzujúce podmienky kladené na optimalizačné premenné. Týmito premennými sú materiálovo-geometrické charakteristiky vybraných komponentov mechanizmu. V prípade všetkých použitých metód bola optimalizácia vykonaná opakovane, zo súboru náhodne generovaných štartovacích bodov, ktoré boli spoločné pre všetky algoritmy. Jednotlivé optimalizačné algoritmy boli naprogramované

a testované v programe *Matlab*. Získané výsledky boli následne štatisticky spracované a využité pre porovnanie uvedených algoritmov.

## 1 POPIS RIEŠENÉHO PROBLÉMU

Riešený mechanizmus pozostáva z kyvadla, ktoré je uchytené na horizontálnom oscilátore (obr. 1). Systém je modelovaný ako sústava dvoch hmotných bodov ( $P_1, P_2$ ), s dvoma *DOF*. Jeho polohu je teda možné popísať pomocou dvoch zovšeobecnených súradníc, ktoré zodpovedajú posunutiu oscilátora  $\chi$  a výchylke kyvadla  $\phi$ . V tu uvedenom prípade uvažujeme len s malými hodnotami zovšeobecnených súradníc. Systém teda môžeme považovať za geometricky lineárny. Vlastné frekvencie sústavy sú ovplyvnené hmotnosťami bodov ( $m_1 = 1,25 \text{ kg}$ ,  $m_2 = 2,25 \text{ kg}$ ), tuhosťou pružiny  $k$  a dĺžkou kyvadla  $l$ . Posledné dva parametre slúžia ako optimalizačné premenné, ktorých hodnoty môžu byť volené výhradne z intervalov  $k \in \langle 40; 260 \rangle \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$  a  $l \in \langle 0,3; 1,9 \rangle \text{ m}$ . Uvedené intervaly definujú obmedzujúce podmienky kladené na tieto premenné. Riešený systém je navyše ovplyvnený tiažovým zrýchlením  $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .



Obr. 1. Riešená sústava

V tomto prípade je cieľom optimalizácie dosiahnuť požadované vlastné frekvencie systému, pomocou vhodne nastavených hodnôt optimalizačných premenných, ktoré musia spĺňať definované obmedzujúce podmienky. Vzhľadom na to, že mechanizmus je modelovaný ako lineárny a má dva  $^{\circ}V$ , má tiež práve dve vlastné uhlové frekvencie  $\omega_i$ . Cieľom optimalizácie je, aby boli hodnoty týchto frekvencií  $\omega_1 = \Omega_1 = \sqrt{10} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  a  $\omega_2 = \Omega_2 = \sqrt{170} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Ak zavedieme substitučné funkcie  $X = \dot{\chi}$  a  $\Phi = \dot{\phi}$ , môžeme pohybové rovnice transformovať na systém diferenciálnych rovníc prvého rádu, v maticovom tvare:

$$\dot{\mathbf{f}} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{f}, \quad (1)$$

kde  $\mathbf{f} = [\chi \ \phi \ X \ \Phi]^T$ , pričom pre maticu  $\mathbf{A}$  platí:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{-k}{m_1} & \frac{m_2 \cdot g}{m_1} & 0 & 0 \\ \frac{k}{m_1 \cdot l} & \frac{-(m_1 + m_2) \cdot g}{m_1 \cdot l} & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Vlastné uhlové frekvencie systému získame riešením nasledujúceho determinantu:

$$|\mathbf{A} - \lambda_i \cdot \mathbf{I}| = 0, \quad (3)$$

kde  $\mathbf{I}$  označuje jednotkovú maticu a  $\lambda_i$  vlastné čísla matice systému (2). Vzhľadom na to, že ide o systém diferenciálnych rovníc prvého rádu, platí, že  $\lambda_i = \omega_i$ . Vďaka jednoduchosti riešeného systému dokázali autori nájsť analytické riešenie pre kvadráty vlastných uhlových frekvencií v tvare:

$$\omega_{1,2}^2 = -\frac{(M \cdot g + k \cdot l)}{2 \cdot m_1 \cdot l} \pm \frac{\sqrt{(M \cdot g + k \cdot l)^2 - 4 \cdot m_1 \cdot gkl}}{2 \cdot m_1 \cdot l}, \quad (4)$$

kde  $M = m_1 + m_2$  označuje celkovú hmotnosť sústavy.

Parametre  $k$ ,  $l$ , pre ktoré budú vlastné uhlové frekvencie systému dosahovať požadované hodnoty  $\Omega_1, \Omega_2$ , bolo taktiež možné vyjadriť analyticky:

$$l_{1,2} = -\frac{m_1 \cdot g \cdot (\Omega_1^2 + \Omega_2^2) \pm \sqrt{Q}}{2 \cdot m_1 \cdot \Omega_1^2 \cdot \Omega_2^2}, \quad (5)$$

$$k_{1,2} = -\frac{\Omega_1^2 \cdot (m_1 \cdot l_{1,2} \cdot \Omega_1^2 + M \cdot g)}{\Omega_1^2 \cdot l_{1,2} + g}, \quad (6)$$

kde:

$$Q = (m_1 \cdot g)^2 \cdot (\Omega_1^2 + \Omega_2^2)^2 - 4 \cdot m_1 \cdot M \cdot (g \cdot \Omega_1 \cdot \Omega_2)^2. \quad (7)$$

To znamená, že vlastné uhlové frekvencie  $\Omega_1 = \sqrt{10} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  a  $\Omega_2 = \sqrt{170} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  je možné dosiahnuť pri  $l = 0,853 \text{ m}$  a  $k = 184,741 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ . Zvyšný pár riešení nie je v súlade s obmedzujúcimi podmienkami.

## 2 OPTIMALIZAČNÝ PROCES

Cieľová funkcia  $F_O$  je na obr. 2 a je definovaná, ako:

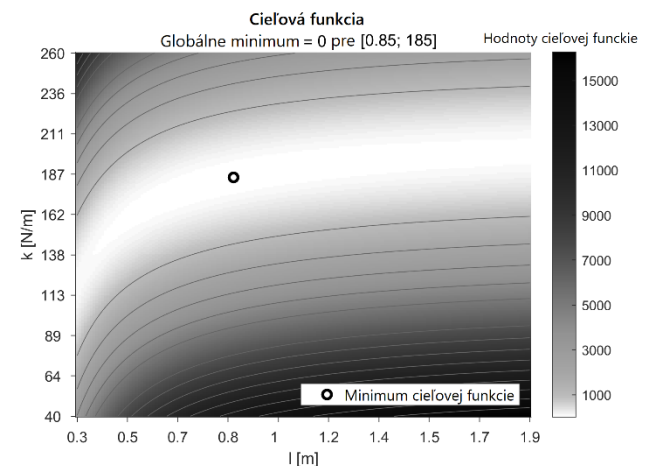
$$F_O = \sum_i (\Omega_i^2 - \omega_i^2)^2, \text{ pre } i = 1, 2, \quad (8)$$

kde  $\omega_i^2$  označuje kvadráty vlastných uhlových frekvencií, zodpovedajúcich hodnotám optimalizačných premenných, zvolených v danom iteračnom kroku.

Obmedzujúce podmienky boli implementované do cieľovej funkcie prostredníctvom kvadratickej penalizačnej funkcie. Použitie kvadratického tvaru

bolo zvolené na zabezpečenie hladkej cieľovej funkcie, čo predstavuje nevyhnutnú podmienku pre správne fungovanie a konvergenciu použitých optimalizačných algoritmov. Tými sú metódy *SDM*, *DFP* a *BFGS*, pričom metóda *SDM* slúžila ako referenčná.

Vzhľadom na to, že poloha optima bola určená vopred, analyticky, je možné posúdiť aj presnosť jednotlivých algoritmov. Tá bola posudzovaná podľa dosiahnutej hodnoty cieľovej funkcie v nájdenom optime (platí, že  $\min(F_O) = 0$ ). Okrem toho boli algoritmy porovnané na základe počtu iterácií a celkového času potrebného počas optimalizácie. Každý algoritmus bol spustený 500-krát, vždy z iného, náhodne generovaného, štartovacieho bodu. Súbor týchto 500 bodov bol spoločný pre všetky algoritmy. Získané výsledky boli následne štatisticky spracované v programe *Matlab*. Podarilo sa tak získať stredné hodnoty a smerodajné odchýlky (*SO*) sledovaných porovnávacích veličín. Ako už bolo uvedené, výsledky získané použitím metódy *SDM* slúžili ako referenčné.



Obr. 2. Zobrazenie cieľovej funkcie

## 3 VÝSLEDKY

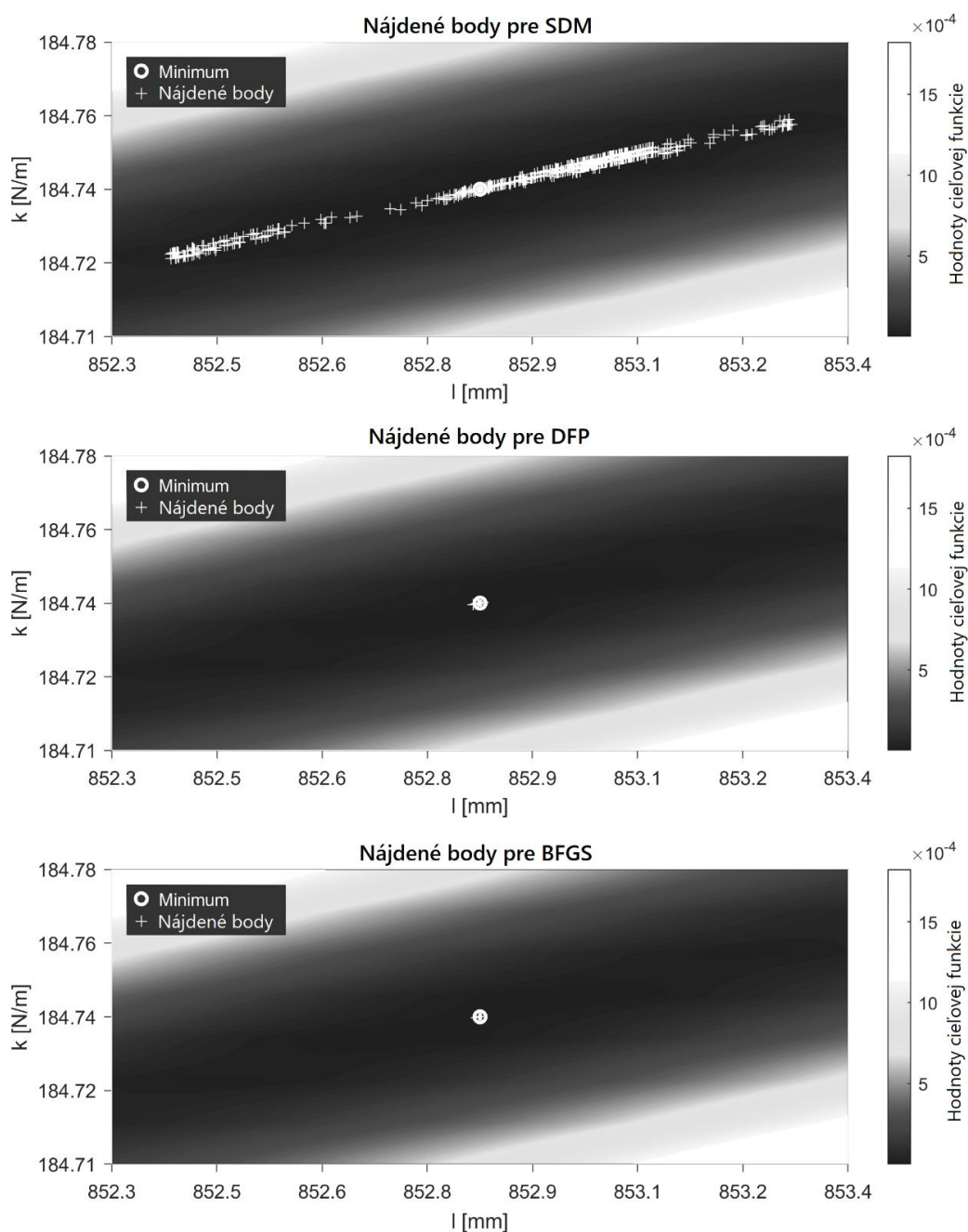
Presnosť a efektívnosť skúmaných algoritmov boli vyhodnocované na základe priemerných hodnôt cieľovej funkcie v nájdenom optime a na základe počtu iterácií a celkového času potrebného na optimalizáciu. Tieto hodnoty, vrátane príslušných smerodajných odchýlok a minimálnych a maximálnych hodnôt, sú uvedené v tab. 1, pričom výsledky pre metódu *SDM* boli zvolené ako referenčné dáta.

Na základe získaných dát je možné povedať, že *quasi-Newtonove* metódy dosahujú výrazne lepšie výsledky ako metóda *SDM*. Toto tvrdenie platí v prípade rýchlosti konvergencie a súčasne aj presnosti. Ako je možné vidieť, *quasi-Newtonove* metódy vyžadujú v priemere zhruba o 90 % menej iteračných krokov, čoho dôsledkom je aj o zhruba 90 % menší výpočtový čas, v porovnaní s metódou *SDM*. Súčasne je možné

Tab. 1. Výsledky

Algoritmus			<i>SDM</i> *	<i>DFP</i>	<i>BFGS</i>
Hodnota cieľovej funkcie	[(rad·s <sup>-1</sup> ) <sup>4</sup> ]	priemer	5,526×10 <sup>-6</sup>	6,518×10 <sup>-11</sup>	4,186×10 <sup>-11</sup>
		<i>SO</i>	5,892×10 <sup>-6</sup>	5,111×10 <sup>-10</sup>	1,151×10 <sup>-10</sup>
Počet iterácií	[-]	priemer	113,7	10,45 (-90,81 %)*	8,148 (-92,83 %)*
		max / min	895 / 5	173 / 4	17 / 4
		<i>SO</i>	167,7	15,88	2,495
Celkový čas	[ms]	priemer	160,2	19,54 (-87,80 %)*	15,46 (-90,35 %)*
		max / min	1251 / 7,189	286,9 / 6,761	33,50 / 6,324
		<i>SO</i>	229,1	27,02	4,938

\* Hodnoty pre *SDM* boli zvolené ako referenčné



Obr. 3. Výsledky

pozorovať, že hodnoty smerodajných odchýlok počtu iterácií a výpočtového času sú pre metódu *SDM*

pomerne veľké, pričom prekračujú aj príslušné stredné hodnoty. Tento jav naznačuje, že celková

efektivita metódy *SDM* je vo veľkej miere ovplyvnená voľbou polohy štartovacieho bodu.

Aj v prípade hodnotenia presnosti dosiahli oba *quasi-Newtonove* algoritmy lepšie výsledky ako metóda *SDM*. Uvedené porovnanie presnosti je znázornené na obr. 3. Algoritmy *DFP* a *BFGS* sa počas riešenia dokázali dostať bližšie k analyticky určenému minimu, čo okrem výsledkov uvedených v tab. 1 dokumentuje aj obr. 3. Ten popisuje rozptyl bodov, ktoré predstavujú minimá nájdené jednotlivými algoritmi, pričom každý z týchto bodov zodpovedá jednému z 500 štartovacích bodov. Na obrázku sú uvedené výseky cieľovej funkcie v blízkom okolí analyticky určeného minima. Rozptyl bodov pri *quasi-Newtonových* metódach je v porovnaní s metódou *SDM* prakticky zanedbateľný. Avšak, aj v prípade tohto algoritmu boli jednotlivé minimá nájdené s pomerne veľkou presnosťou, pričom rozptyl získaných výsledkov nemá zásadný vplyv na vlastné frekvencie optimalizovaného systému.

Pri vzájomnom porovnaní *quasi-Newtonových* metód je možné vidieť, že algoritmus *BFGS* je mierne efektívnejší, ako *DFP*, čo dokumentuje menšia stredná hodnota počtu iterácií a výpočtového času. Významnejšie rozdiely však vznikajú v prípade smerodajných odchýlok, ktoré naznačujú menšiu citlivosť na voľbu polohy štartovacieho bodu v prípade algoritmu *BFGS*. Z hľadiska presnosti sú rozdiely medzi metódami *DFP* a *BFGS* prakticky zanedbateľné.

Na základe celkových výsledkov je možné povedať, že *quasi-Newtonove* metódy umožňujú výrazný nárast efektivity riešenia optimalizácie, v porovnaní so základnou metódou *SDM*.

## ZÁVER

Táto práca bola venovaná porovnaniu efektivity a presnosti metódy *SDM* a *quasi-Newtonových* algoritmov *DFP* a *BFGS*. Uvedené algoritmy boli naprogramované v programe *Matlab* a aplikované pri optimalizácii parametrov jednoduchého mechanizmu s dvomi °V, za účelom jeho spektrálneho naladenia. Pri uvedených algoritmoch bol skúmaný počet potrebných iterácií a celkový výpočtový čas, ako parametre charakterizujúce efektívnosť a dosiahnuté minimálne hodnoty cieľovej funkcie, ktoré slúžili ako charakteristika presnosti algoritmov. Uvedené dáta boli štatisticky spracované v programe *Matlab*, pričom výsledné štatistické veličiny tvorili základ pre vzájomné porovnanie skúmaných algoritmov.

Z porovnania jednotlivých algoritmov vyplýva, že *quasi-Newtonove* metódy v zásadnej miere presahujú možnosti základnej metódy *SDM*, pričom sa vyznačujú najmä vysokou efektívnosťou. Tá je charakterizovaná výrazným poklesom počtu

potrebných iterácií a aj výpočtového času, pričom sa v priemere jedná o zhruba 90% pokles. Ďalšou prednosťou algoritmov *DFP* a *BFGS*, v porovnaní s metódou *SDM*, je ich výrazne nižšia citlivosť na voľbu štartovacieho bodu. Prejav nižšej citlivosti je možné zaznamenať na základe nízkych hodnôt smerodajných odchýlok sledovaných porovnávacích veličín. Rozdiely medzi jednotlivými algoritmi sú pozorovateľné aj pri dosahovanej presnosti, ktorá je viditeľne vyššia v prípade *quasi-Newtonových* metód. V tomto prípade však nárast efektivity predstavuje významnejší jav.

Zo vzájomného porovnania metód *DFP* a *BFGS* vychádza, že druhý uvedený algoritmus dosahuje vyššiu efektívnosť, avšak len vo veľmi obmedzenej miere. Metóda *BFGS* sa okrem toho vyznačuje menšou citlivosťou na voľbu počiatočného bodu, avšak opäť len v pomerne malej miere voči metóde *DFP*. Z hľadiska presnosti sú oba algoritmy navzájom porovnateľné.

Výsledky ukazujú, že v prípade rozhodovania medzi gradientnými optimalizačnými algoritmi sú modifikované, *quasi-Newtonove* metódy podstatne lepšou voľbou, než základné metódy, ktoré využívajú len výpočet gradientu, a to najmä vďaka výrazne vyššej efektívnosti, ktorú dokážu dosiahnuť.

## Podakovanie

Táto práca vznikla s podporou grantového projektu VEGA, 1/0423/23 a projektov KEGA 002ŽU-4/2023 a KEGA 005ŽU-4/2024.

## LITERATÚRA

- [1] SVOBODA, M. - SCHMID, V. - SOUKUP, J - SAPIETA, M. (2017): *Modal Analysis of the Vehicle Model*. In: *Dynamical Systems in Applications*, Łódź, Poland, pp. 351-362.
- [2] SÁGA, M. - VAŠKO, M. - KOCÚR, R. - TOTH, E. (2006): *Aplikácia optimalizačných algoritmov v mechanike telies*. Žilina, VTS pri ŽU.
- [3] MENON, C. - VERTECHY, M. - MARKOT, C. - CASTELLI, V. P. (2009): *Geometrical Optimization of Parallel Mechanisms Based on Natural Frequency Evaluation: Application to a Spherical Mechanism for Future Space Applications*. In: *IEEE Transactions on Robotics*, 25(1), pp. 12-24. DOI: 10.1109/TRO.2008.2008744.
- [4] DONG-HUI, L. - FUKUSHIMA, M. (2000): *On the Global Convergence of BFGS Method for Nonconvex Unconstrained Optimization Problems*. In: *SIAM Journal on Optimization*, 11(4). DOI: 10.1137/S1052623499354242
- [5] FLETCHER, R. - POWELL, M. J. D. (1963): *A Rapidly Convergent Descent Method for Minimization*. In: *The Computer Journal*, 6(2), pp. 163-168.

## Magazin TECHNOLOG

*Publiziert werden wissenschaftliche, fachliche und Forschungsbeiträge, theoretische Abhandlungen, Anleitungen, Studien, Rezensionen, Informationen über die Bearbeitung der technischen Materialien. Der Fokus liegt auf Beiträgen und Arbeiten, die sich mit den Fragen aus dem Gebiet der Span- und Spanlosen Technologien, der physikalischen Prinzipien der unkonventionellen Technologien, der technologischen Konstruktion der Werkzeuge, der wirtschaftlichen Seite des Herstellungsprozesses, der Ökologie, so wie der Abfallverwertung befassen. Genauso werden Beiträge über Maschinen, Werkzeuge, Vorrichtungen und Messtechnik für den Bereich der mechanischen Technologien, Untersuchungsergebnisse über die Informationstechnologie im technologischen Bereich publiziert. Des weiterem werden Beiträge über die Geschichte und die Entwicklung der mechanischen Technologie veröffentlicht. Das Magazin TECHNOLOG publiziert Beiträge in folgenden Sprachen: Slowakisch, Tschechisch, Polnisch, Russisch, Englisch und Deutsch.*

Alle Beiträge sind rezensiert und die Redaktion behält sich den Anspruch auf ihre Bearbeitung durch sie vor. Die Redaktion übernimmt keine Verantwortung für mögliche Schäden, die durch die Anwendung der Tätigkeiten, Methoden, Produkte, Ideen, Anleitungen etc. publiziert durch die Autoren der Beiträge verursacht werden.

**Evidenznummer MK SR-2800/08.**

**ISSN 1337-8996**

**Adresse der Redaktion: Universität Žilina, Fakultät Maschinenbau, Univerzitná 1, 01026 Žilina**

**Telefon: +421 (0) 41-513 2764, 513 2814,**

**Fax: +421 (0) 41-513 1535**

**Email: jan.moravec@fstroj.uniza.sk**

## Журнал ТЕХНОЛОГ

*Печатает научные, исследовательские, профессиональные, теоретические работы, инструкции, аналитические обзоры, рецензии, информации о переработке технических материалов. Направлен на печатание работ посвященных вопросам в области технологий обработки со стружкой и без, физикальных принципов нестандартных технологий, технологичности конструкции инструментов, экономики производственного процесса, экологизации, переработке отходов. Также публикует работы о машинах, инструментах, препаратах и измерительной технике для области механических технологий, результатов научных исследований в сфере информационных технологий в технологической области. Публикует статьи по истории и эволюции механических технологий. Журнал публикует статьи на языках: словацком, чешском, польском, русском, английском и немецком.*

Все статьи рецензируются и редакция оставляет за собой право их редакционного корректирования. Редакция не несет никакой ответственности за возможные повреждения вызванные использованием операций, методов, продуктов, идей, инструкций и т.д. в опубликованных авторами статьях.

**Регистрационный номер MK SR 2800 - /08.**

**ISSN 1337 – 8996**

**Адрес редакции: Žilinská univerzita, strojnica fakulta, Univerzitná 1, 01026 Žilina**

**Telefón: 041-513 2764, 513 2814**

**Fax: 041-513 1535**

**e-mail: jan.moravec@fstroj.uniza.sk**

**ISSN 1337-8996**

**DOI: <https://doi.org/10.26552/tech.J.2025.4>**