

Efektivnost využití simulací, 3D tisku, virtuální a rozšířené reality při stavbě vědeckých experimentů

V tomto článku porovnáváme různé nástroje konstruktérů a vývojářů při stavbě vědeckých experimentů. V současné době trh nabízí velké množství nástrojů, které tzv. urychlí prototypování. Tyto nástroje jsou většinou velmi drahé a vyžadují specialisty, kteří s nimi umí pracovat. Při rozhodování, kterým směrem jít, je poměrně složité dopředu specifikovat všechny potřeby týmu tak, aby bylo prototypování co nejefektivnější. Chceme ukázat naši konstruktérskou cestu metodou rychlého prototypování za přispění počítačových simulací, technologie 3D tisku a zobrazení virtuální reality. Porovnáme náročnost na lidské zdroje, poměr cen a výslednou kvalitu prototypů.

Klíčová slova: rychlé prototypování, aditivní výroba, FFF, FDM, 3D tisk, optomechanický návrh, virtuální realita, rozšířená realita, simulace, CFD, HiLASE

1 ÚVOD

Ve vědeckém výzkumném Centru HiLASE je vyvíjeno více než dvacet laserových systémů pro vědecké a průmyslové aplikace. Tyto lasery mají různé výstupní parametry: od pikosekundových pulzů s energiemi 5 mJ – 0,5 J a opakovacími frekvencemi 1–100 kHz (lasery Perla na bázi technologie tenkového disku) až po systémy s výstupní energií 100 J v nanosekundových pulzech s opakovací frekvencí 10 Hz (lasery Bivoj a Kazi na bázi multi-slab laserových technologií) [1]. Paralelně s výzkumným tempem drží krok i technická realizace.

ETS (Engineering & Tech Support) tým dělá technickou podporu celému vědeckému týmu v Centru HiLASE. Na základě požadavků vědeckých pracovníků konstruuje, vyrábí, či nechává vyrábět součástky experimentů, které následně kompletuje a spolu s vědci i provádí funkční zkoušky těchto částí. Konstrukční zadání a požadavky vědeckých pracovníků přicházejí často v podobě ručních nákresů, náčrtů v MS Powerpoint či schematických 3D modelů. Konstruktéři z ETS teamu disponují poměrně širokou škálou nástrojů. Hlavním a prvním nástrojem je SOLIDWORKS Premium 2020, ve kterém se zhodnotuje jak prvotní vizualizace řešení, tak výrobní dokumentace. Do toho vstupují stažené komerční modely, které lze použít např. pro virtuální a rozšířenou realitu, ale ne pro výrobní podklady. Prakticky nikdy se výroba jednotlivých komponent neopakuje. Vzhledem k cenové náročnosti těchto komponent není ani prostor na chyby a je nutné, aby každý prvek byl funkční již při první implementaci do systému. Z pohledu výroby se dá říci, že se jedná o zhodovení funkčních prototypů.

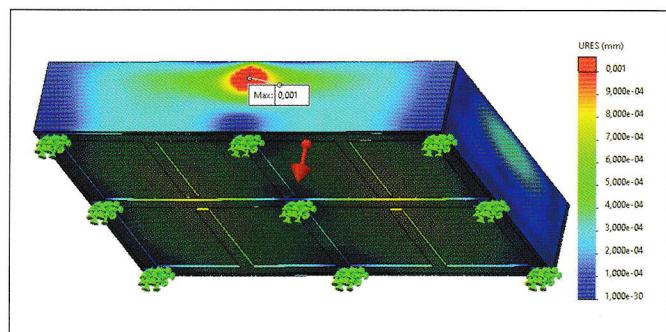
2 SIMULUJI, SIMULUJEŠ, SIMULUJEME

Pro prvotní ověření realizovatelnosti obvykle používáme simulaci nástroje, které umožňují rychle přiblížit chování složitých dílů a sestav za daných provozních podmínek. To je zvláště výhodné v případě složitých a hmotných (tedy obtížně prototypovatelných) konstrukcí. Základními nástroji jsou lineární statické analýzy obsažené v programu SOLIDWORKS a dále simulace proudění tekutin a sdílení tepla (CFD – Computational Fluid Dynamics) obsažené v doplňkovém modulu SOLIDWORKS Flow Simulation.

2.1 Aby to něco vydrželo

Nejčastější využití nachází statická analýza při návrhu manipulačních vlastností a manipulačních prostředků pro jednotlivá

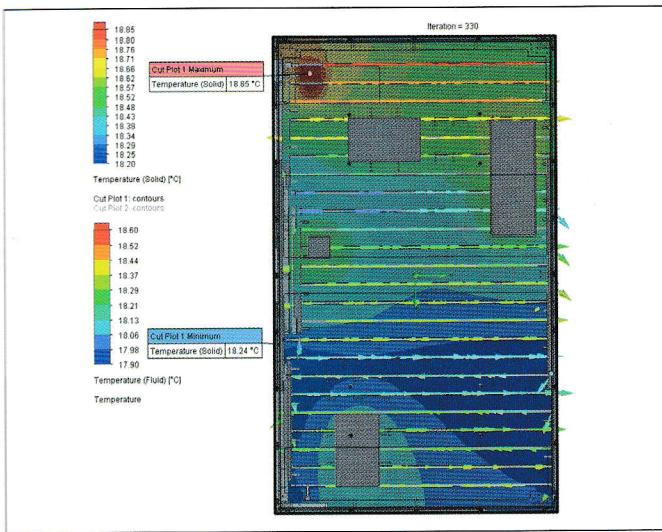
laserová zařízení. Tato zařízení jsou díky své jedinečnosti často osazena do unikátních boxů, které vytvářejí nosnou a ochrannou strukturu laseru, stejně jako rozhraní pro jeho technologické a datové připojení. Pro bezpečnou manipulaci s takovým boxem je nutno navrhnut jeho optimální tuhost, aby se nedeformoval vlastní hmotností navýšenou o součet hmotností komponent laseru. Dále je nezbytné zkonstruovat manipulační prvky umožňující zavěšení celého zařízení na jeřáb, transport pomocí paletových a vysokozdvížných vozíků a přesné usazení na požadované místo. Tyto manipulační prostředky musí být konstruovány s ohledem na jejich maximální tuhost, kompaktnost a zároveň s minimálním mechanickým vlivem na laserový box. Na obr. 1 je vidět výsledek simulace prohnutí laserového boxu umístěného na podpěrách působením vlastní hmotnosti a přídavné zátěže.



Obr. 1 Statická analýza deformace laserového boxu

2.2 ... a aby to chladilo

CFD analýzy jsou úspěšně používány stejně jako statické analýzy například při návrhu laserových boxů. Boxy kromě ochranné a nosné funkce zajišťují i optimální teplotní prostředí laseru. Toho lze dosáhnout např. vodním chlazením základové desky laseru (simulace gradientu teploty chladicího média probíhajícího v chladicích kanálech je vidět na obr. 2), které při vhodné konfiguraci odvádí teplo z bodových zdrojů – prvků laseru a přispívá ke stabilizaci teploty vnitřního prostředí boxu. Studie tedy v tomto případě zahrnuje nejen analýzu dynamiky tekutin, ale i přenos tepla.



Obr. 2 Komplexní analýza přenosu tepla a proudění kapaliny v chladicích kanálech laserového boxu

3 RYCHLÉ PROTOPOVÁNÍ V PROSTŘEDÍ LABORATOŘE

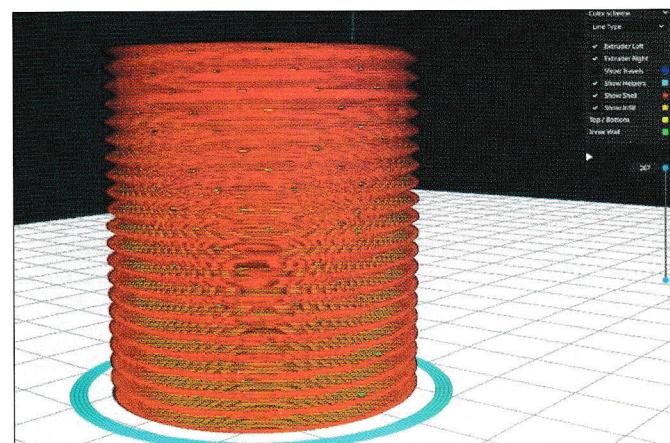
Další metodou ověření funkceschopnosti konstrukčního návrhu je zhotovení prototypu. V posledních několika letech pozorujeme masivní rozšíření aditivních technologií ve všech průmyslových odvětvích. Centrum HiLASE se rovněž rozhodlo zařadit tyto technologie do portfolia svých výrobních procesů. Hlavní výhodou technologie 3D tisku je rychlá a levná výroba poměrně kvalitních lehkých dílů.

3.1 Jsme soběstační a nejen časově flexibilní

Použitím 3D tisku se nám podařilo výrazně urychlit vývojový proces. Centrum HiLASE nemá prostorové kapacity pro vlastní výrobní dílny. Výrobu zajišťujeme buď ve sdílených dílnách Fyzikálního ústavu Akademie věd, nebo u externích dodavatelů. Díly, které jsme dříve nechávali vyrábět běžným způsobem, byly obvykle dodány 4–6 týdnů po schválení návrhu. Taktoto dlouhé čekání doby jsou pro vývoj nových zařízení značně nevhodující a veškeré modifikace zabírají spoustu času.

Spouštěli jsme naše technologické pracoviště s jednou FFF (Fused Filament Fabrication) tiskárnou a v současné době máme již čtyři. Poptávka po tištěných součástech stále roste a v budoucnu bude nutné dokoupit další vybavení. Počet tištěných dílů v roce 2019 přesáhl 700 kusů.

Zřízením prostorově i finančně velmi úsporného technologického pracoviště FFF technologie jsme získali částečnou soběstačnost, která se odrazila i na časové flexibilitě. Nyní jsme schopni některé díly vytvářet během několika hodin od schválení designu. Běžně se díl montuje již druhý den od dokončení 3D návrhu. S takto velkou rychlosťí výroby prototypových dílů jsme schopni řešit požadavky na jakékoli konstrukční změny bez větších zpoždění.



Obr. 3 Závitová redukce spojující díly s rozdíly v imatriálním a metrickém systému; příprava k tisku (vlevo), namontovaná v laboratoři (vpravo)

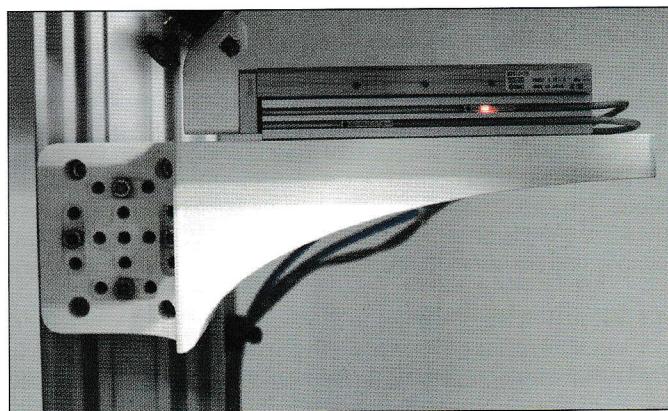
3.2 Všechno zkombinujeme...

Ve velkém měřítku kombinujeme zakoupené komponenty s vlastními výrobky. Není výjimkou, že se na jednom stole sejdou díly vyrobené v USA, Německu a Anglii. Většinou z důvodu nedostatečné kompatibility nebo nedostatku konstrukčních vlastností běžně dostupných komponent jsme vedeni k vlastním řešením. Konstrukční tým tedy musí přijít s řešením jak propojit dva nekompatibilní systémy, např. díly konstruované v imatriálním a v metrickém systému. Toto je okamžik, kdy se technologie 3D tisku ukázala jako velmi rychlý a efektivní nástroj, jímž lze vyrobit díl umožňující toto propojení. Takový díl je vidět na obr. 3. Propojuje rozdíly obou systémů. Tištěný díl může také sloužit pro sjednocení závitů.

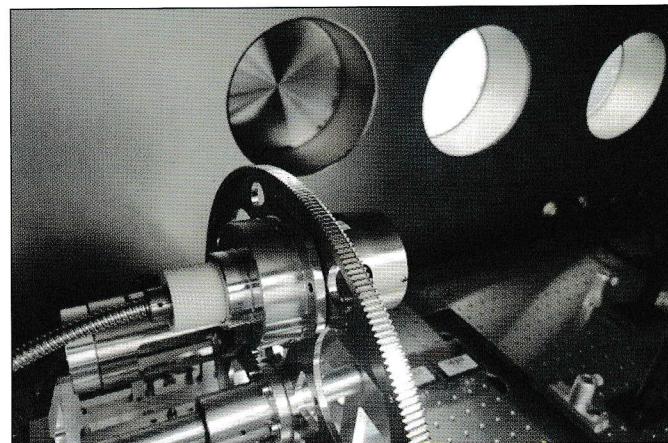
Při použití správného materiálu a nastavení tisku lze dosáhnout dosažující přesnosti a tuhosti. Máme tiskárny s více extrudéry, čímž můžeme vyrábět jeden díl kombinovaný z více materiálů. Spojení dvou materiálů dokážeme vytvořit speciální vlastnosti nebo různé barvy finálního dílu. Můžeme například snadno kombinovat materiály v jedné součásti.

3.3 Ještě se to sem musí vejít

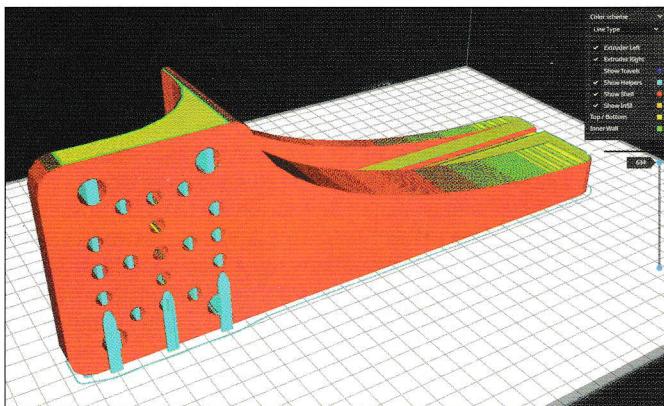
Laserová laboratoř má své specifické prostředí, materiály a díly. Optické součásti laserových systémů jsou citlivé na vibrace. Optomechanické části, stojany a držáky proto musí být tuhé. Stabilitu výkonu těchto laserových subsystémů nelze snížit použitím plastových dílů [2]. Přesto lze technologii 3D tisku použít jako první krok v procesu návrhu ke kontrole životaschopnosti návrhu. Složitost a počet našeho laboratorního vybavení a prostorové omezení představují nezanedbatelné riziko kolize s jinými součástmi. Aby se tomuto riziku zabránilo, je před objednáním výroby drahé součásti vyroben levný plastový díl. Tato levná testovací součást je vyzkoušena na správném místě v systému, a tím ověřena prostorová správnost návrhu. Pokud dojde ke kolizi, je součást přepracována s nižšími náklady a spotřebou času. Jako ukázku lze použít držák



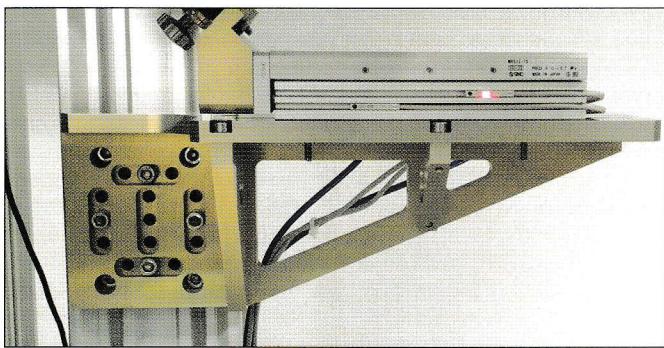
Obr. 4 Držák pneumatického stolku testovaný v laboratoři



pneumatického stolku na obr. 4, 5 a 6. Výsledný držák komplikovaného tvaru byl vyroben z hliníku a vážil 1,6 kg. Otestován byl plastovým prototypem. Ten prokázal správné prostorové uspořádání a umožnil zjednodušení připojovacích míst výsledného držáku.



Obr. 5 Tisková příprava držáku: 330 gramů použitého materiálu, časová náročnost 44 hodin tisku



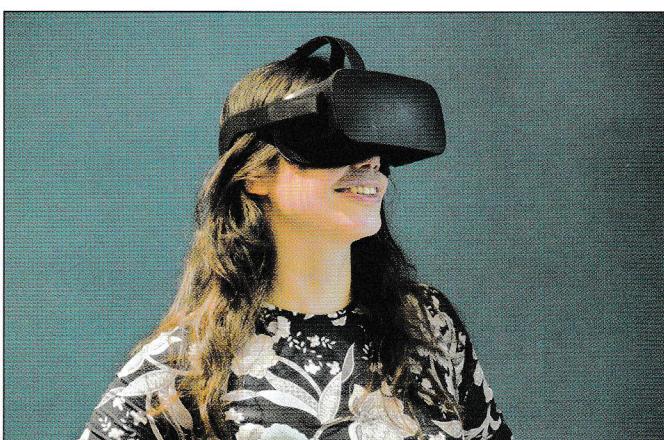
Obr. 6 Finální kovový držák namontovaný v laboratoři, celková doba dodávky cca 8 týdnů

4 VIZUALIZACE FORMOU VIRTUALIZACE

Hotové a schválené konstrukční modely slouží nejen k výrobním, ale i k prezentačním účelům. V Centru HiLASE využíváme kromě klasických vizualizačních metod, jakými jsou například renderované obrázky, i moderní technologie virtuální a rozšířené reality. Tyto metody jsou si poměrně blízké a často bývají nesprávně zaměňovány.

4.1 VR není AR?

Virtuální realita (VR – Virtual Reality) vytváří kolem uživatele izolovaný virtuální prostor, který nezahrnuje prvky skutečného okolí. Výjimkou jsou např. limity pohybu uživatele, které jsou do virtuálního prostoru promítány.



Obr. 7 Headset pro VR Oculus Rift S

Rozšířená realita (AR – Augmented Reality) využívá pohled uživatele na skutečné okolní prostředí a jeho doplnění o virtuální objekty.

Obě zařízení jsou obvykle koncipována jako stereoskopické brýle, u VR vytvářející virtuální prostor, u AR umožňující průhled a promítání virtuálních objektů do reálného prostoru [4]. Pro AR lze případně využít i zobrazovací zařízení s dostatečným výpočetním výkonem umožňující snímání okolí a své polohy – typicky chytrý telefon nebo tablet.

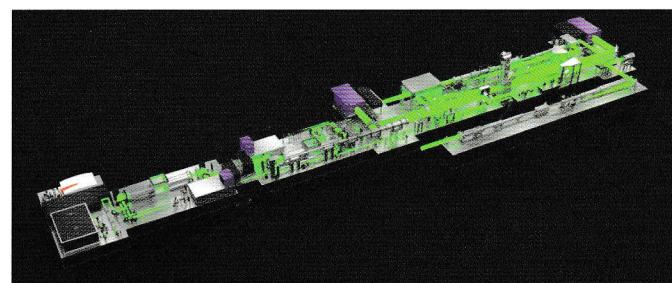
Z toho je jasný patrný rozdíl ve využití těchto technologií. VR umožňuje vytvoření komplexního virtuálního prostoru v zásadě nijak neomezeného vnějším prostředím a naopak AR aktivně s vnějším prostředím pracuje a využívá jej.



Obr. 8 AR brýle Microsoft Hololens

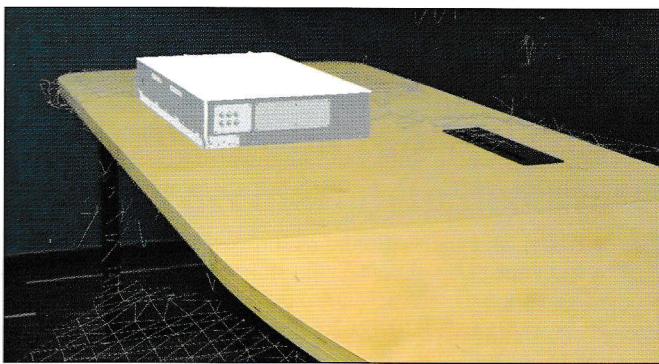
4.2 VR a AR jako nástroj (nejen pro PR)

V současné době je virtuální realita (Oculus Rift S) v Centru HiLASE používána v první řadě pro prezentaci vysokoenergetického laserového systému Bivoj, který je z pohledu 3D modelu charakteristický svými rozměry a členitou strukturou, jak lze vidět na obr. 9. Díky VR může být tento laser prakticky kdekoliv a kdykoliv detailně představen, čímž odpadá nutnost návštěvy laserové laboratoře a zároveň je uživateli virtuální reality umožněn absolutně svobodný a bezpečný pohyb v prostoru laseru. Jako výhodné se do budoucna jeví použití virtuální reality například pro prohlídky dalších laserových systémů a laboratoří nebo prezentaci záměru laboratorních přestaveb a rekonstrukcí.



Obr. 9 Kilowattový laserový systém Bivoj v prostředí virtuální reality

Rozšířená realita (Microsoft Hololens) se využívá v případě modelů kompaktních laserových systémů Perla. Zde poskytuje efektivní zobrazení těchto laserů v reálném světě, jak je ukázáno na obr. 10. U uživatelského hlediska to znamená umístění laseru jako virtuálního objektu libovolně do okolního prostředí, jeho prohlídku a základní seznámení pomocí interaktivních prvků modelu. Tento proces je zvláště užitečný v případě, že vizualizaci je nutno provést v kontextu daného prostředí, typicky z důvodů zástavby. To dává předpoklad pro další budoucí využití rozšířené reality v případě komerčních laserových systémů, kdy bude možno snadno ověřit jejich instalovatelnost u koncového zákazníka.



Obr. 10 Tenkodiskový laserový systém Perla 100 zasazený do reálného prostředí pomocí AR

Pro systémy virtuální i rozšířené reality je v současné době připravován vysoko detailní model druhé generace laserového systému Perla. Ten bude komplexně využíván pro výukové i marketingové účely.

ZÁVĚR

Poměr finanční náročnosti mezi jednotlivými systémy jsme vztáhli k ceně za 3D CAD nástroje. Jako příklad outsourcingu vybrané technologie lze použít cenu konverze 3D modelu laseru Bivoj do VR aplikace, která činila približně 1/3 cenu zaškolení pro VR. Pokud je aplikace pro virtuální realitu doplněna například o 3D volumetrickou nahrávku průvodce s komentářem, může se její cena zhruba zdvojnásobit (tj. 2/3 ceny zaškolení pro VR).

Všechny uvedené nástroje vyžadují kromě doby nutné k vyhledání, vysoutěžení a nákupu hardwaru a softwaru také nezadanatelný čas na zaškolení pracovníků pro jejich relativně vysokou specializaci. Z našich zkušeností vyplývá, že jeden pracovník – konstruktér nezvládne obsluhovat bez pomoci dalších specialistů všechna tato zařízení. V následující tabulce jsme se odhadl porovnání v přepočtu na ekvivalent plného pracovního úvazku (FTE - Full-time Equivalent).

Tab. 2 Časová náročnost technologií [5, 7–11]

Technologie	Čas na zaškolení [h]	FTE [-]
3D CAD - SOLIDWORKS Premium	32	0,8
Simulační SW SOLIDWORKS - Simulation Standard - Flow Simulation	48	0,5
3D tisk - 3D tiskárna SigmaX R19 - SW Cura - SW Simplify 3D	25	0,5
Rozšířená realita - Microsoft Hololens - SW Blender - SW Unity 3D	63	0,6
Virtuální realita - Oculus Rift S - SW Blender - SW Unity 3D	61	0,6

Dalším zajímavým námětem je pomocný HW (typicky 3D tiskárny nebo sety pro virtuální realitu), který budeme implementovat do jednoho pracoviště, nebo naopak jít cestou více oddělených pracovišť, které se potom více specializují a vytvářejí kapacitní prostor.

Obecně nelze říci, že by bylo možné nahradit klasické prototypování těmito pokročilými metodami. Lze ale často prototyp vytvořit na mnohem vyšší úrovni, a tím podstatně zkrátit časy prototypování. Vzhledem k tomu, že Hilase je vědeckým centrem, můžeme často zanechat takto vytvořený díl v dalším užívání, bez dalších nároků na redesign.

Tab. 1 Finanční náročnost technologií [6–8, 11]

HW a SW pro technologii	Jednotkové náklady na pořízení technologie [-]	Jednotkové náklady na zaškolení [-]	Celkové jednotkové náklady [-]
3D CAD - SOLIDWORKS Premium - Výpočetní a grafické PC	1,00	1,00	1,00
Simulační SW SOLIDWORKS - Simulation Standard - Flow Simulation	1,27	2,60	1,42
3D tisk - 3D tiskárna SigmaX R19 - SW Cura - SW Simplify 3D	0,44	2,08	0,50
Rozšířená realita - Microsoft Hololens - SW Blender - SW Unity 3D	0,22	7,95	0,52
Virtuální realita - Oculus Rift S - PC pro VR - SW Blender - SW Unity 3D	0,15	4,77	0,33

PODĚKOVÁNÍ

Práce na tomto článku byla finančně podpořena Evropským fondem pro regionální rozvoj a státním rozpočtem České republiky (Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání; projekt HiLASE CoE, čís. CZ.02.1.01/0.0/0.0/15_006/0000674; program NPU I, projekt čís. LO1602).

Literatura

- [1] Divoky, M., Smrz, M., Chyla, M., Sikocinski, P., Severova, P., Novak, O., et al.: Overview of the HiLASE project: high average power pulsed DPSSL systems for research and industry. *High Power Laser Sci. Eng.* 2 (2014). <https://doi.org/10.1017/hpl.2014.16>
- [2] Aliheidari, N., Tripuraneni, R., Hohimer, C., Christ, J., Ameli, A., Nadimpalli, S.: The impact of nozzle and bed temperatures on the fracture resistance of FDM printed materials. *Proc. SPIE, Behav. Mech. Multifunct. Mater. Compos.* 10165, 1016512 (2017). <https://doi.org/10.1117/12.2260105>
- [3] Shubham, P., Sumit, J.: Optimization of process parameter to improve dynamic mechanical properties of 3D printed ABS Polymer using Taguchi method. In: ARSSS International Conference, Goa (2018)
- [4] Bradski, G.R., Miller, S.A., Abovitz R.: Methods and Systems for Creating Virtual and Augmented Reality, US. Patent US10203762B2, 13. 6. 2015 <https://patents.google.com/patent/US10203762B2/en>
- [5] 4 kroky, jak využít virtuální realitu ve výuce. (2020) <https://www.vupi.cz/cs/akce/4-kroky-jak-využít-virtuální-realitu-ve-výuce-vzdelavací-kurz-26-28-05-2020.html>
- [6] BCN3D SigmaX R19. (2020) <https://www.abc3d.cz/produktova-stranka/bcn3d-sigmax-r19>
- [7] Getting Started with Augmented Reality Počítačový kurz. (2020) <https://www.nobleprog.cz/cc/ar>
- [8] Introduction to Virtual Reality (VR) Počítačový kurz. (2020) <https://www.nobleprog.cz/cc/vr>
- [9] Live Augmented Reality Workshop. (2020) <https://circuit-stream.com/workshop/upcoming-live-ar-workshop/>
- [10] Naučte se vytvářet aplikace ve virtuální realitě. (2020) <https://www.vupi.cz/cs/akce/naučte-se-vytvářet-aplikace-ve-virtuální-realitě-vzdelavací-kurz-7-9-4-2020-1579085058.html>
- [11] SolidVision. (2020) <https://www.solidvision.cz/>

Ing. Martina Řeháková, e-mail: martina.rehakova@hilase.cz, tel.: + 420 314 007 717, Ing. Pavel Crha, Ing. Jan Heřmánek, Ing. Karolina Macúchová, Ph.D., Milan Melichar, Václav Němec, HiLASE Centre, Fyzikální ústav AVČR, Za Radnicí 828, 252 41 Dolní Břežany

Jedná se o vědecký článek

Integrovaná optika oproti integrované fotonice

Už několik desetiletí se vytváří nový vědní a technický obor v oblasti optiky a fotoniky, který se nazývá **integrovaná optika (integrated optics)**. V podstatě jde o vlnovodné šíření světla v *planárních vlnovodech*, což jsou tenké vrstvy zvýšeného indexu lomu na dielektrických podložkách, a v těchto tenkých vrstvách se šíří světlo, které se udržuje uvnitř na základě úplného vnitřního odrazu. Až potud by název oboru mohl znít **planární vlnovodná optika (planar guiding wave optics)**. Avšak metodou integrace je pak možno vytvářet po ploše potřebné obrazce jako kanálky, v nichž je světlo vymezováno i bočně. Tak vznikají např. rozvětvení či naopak spojení a z takových a podobných komponent se skládají **integrované obvody**, které plní různé činnosti. Komponenty nemusí být jen pasivní, ale různě ovládané jako aktivní či dynamické. Do obvodů lze ovšem zaintegrovat i světelné zdroje.

Souběžně s pokrokem v tomto oboru probíhá také normativní činnost. Prvním a přednostním subjektem normativní činnosti je kodifikace **terminologického slovníku** či **názvosloví (vocabulary)**, aby si jednotliví uživatelé navzájem rozuměli.

V tomto oboru se vytvořila mezinárodní norma již před deseti roky a nyní probíhá jako obvykle její revize. První věc, která mě poněkud znejistila, je samotný název oboru. Nikdo se nezamyslel nad tím, zdali název vzniklý zcela náhodně lidmi na začátku vytváření oboru se z všeobecného hlediska hodí. Autor tohoto příspěvku se snažil již před mnoha desetiletími formulovat rozdíly mezi optikou a fotonikou, a publikoval v tomto směru příspěvek i v tomto časopisu, viz *M. Miler: Úvaha nad optoelektronikou. Jem.mech.opt. 20/9 (1975) 269*. V podstatě jde o to, že optika by z technického hlediska šíření informace měla být chápána jako *paralelní přenos*

optické informace, tedy přenášení obrazů. K tomu je třeba kromě znalostí základních poznatků z **fyzikální optiky** (pozor: zde není myšlena fyzikální optika jako synonymum vlnové optiky, ale jde v podstatě o základní optické jevy a o interakci světla s hmotou, tedy fyzikální základy optiky) mít ještě znalosti o umělých strukturách, jako jsou čočky, zrcadla, detektory apod. A fotonika obdobně jako elektronika by měla představovat fyzikálně-technický obor, kdy přenos informace má *sériovou podstatu*. Jde tedy o kanálové šíření informace a typickým fotonickým nositelem přenosu je optické vlátko, které by se tedy mělo spíše nazývat fotonickým vlákном (*photonic fibre*). Celý obraz se pak přenese postupně jedním kanálem po obrazových elementech.

Název oboru by měl tedy spíše znít **integrovaná fotonika (integrated photonics)**.

Na závěr ještě poznámka z výrobní praxe. Podle letošního srpnového čísla amerického odborného časopisu *Photonics Spectra* existuje ve státě New York od r. 2015 **American Institute for Manufacturing Integrated Photonics** (ve zkratce AIM Photonics), který vytváří už pět let fotonické integrované obvody (*PIC – Photonic Integrated Circuits*), poskytující fotonické komunitě přístup k pokročilé technologii, kapacitám a zdrojům skrze celý PIC cyklus vývoje výrobku – od návrhu, vyzkoušení koncepce, vývoje a směrování výroby až ke konečnému testování, kompletování a adjustaci výrobku“. Využívají přitom substrátových salámků o průměru 300 mm, takže žádné troškaření! Jak je zřejmé, názvosloví v normativní činnosti zaostalo za praxí.

Miroslav Miler