

Biomedicínské inženýrství v současné české kardiologii

David Pospíšil, Monika Míková, Jan Řehoř, Kristýna Hochmanová, Veronika Bulková, Nela Hejtmánková

Interní kardiologická klinika, Fakultní nemocnice Brno a Lékařská fakulta Masarykovy univerzity, Brno

Biomedicínské inženýrství se stalo nedílnou součástí moderní kardiologické péče, čímž se otevřely nové možnosti pro diagnostiku a léčbu srdečních onemocnění. Tento interdisciplinární obor propojuje technické a medicínské znalosti, aby vytvořil inovativní řešení, která zvyšují kvalitu života pacientů. Biomedicínské inženýři jsou v rámci kardiologie nejčastěji zaměstnáváni v oborech, jako je elektrofyzilogie, neinvazivní kardiologie, intervenční kardiologie, telemedicina a v dalších specializovaných odvětvích, kde kromě klinické práce využívají své odborné znalosti k optimalizaci technologií a zdravotnických přístrojů. Dále se podílejí na vývoji a zdokonalování technologií jako jsou biosenzory, implantabilní zařízení, pokročilé metody zpracování signálů a využití umělé inteligence pro diagnostiku. Spolupráce mezi lékaři a inženýry je klíčová pro zlepšení péče o pacienty a umožňuje vývoj efektivních léčebných postupů. Tento článek se zaměřuje na úlohu biomedicínských inženýrů v kardiologii, jejich profesní postavení v českém zdravotnictví a budoucí výzvy, které obor přináší.

Klíčová slova: biomedicínské inženýrství, kardiologie, diagnostické technologie, telemedicina, umělá inteligence, rozšířená realita, 3D tisk.

Biomedical engineering in contemporary Czech cardiology

Biomedical engineering has become an integral part of modern cardiac care, opening up new possibilities for the diagnosis and treatment of heart disease. This interdisciplinary field combines technical and medical expertise to create innovative solutions that improve the quality of life for patients. Within cardiology, biomedical engineers are most commonly employed in fields such as electrophysiology, non-invasive cardiology, interventional cardiology, telemedicine and other specialised fields where, in addition to clinical work, they use their expertise to optimise technologies and medical devices. They are also involved in the development and improvement of technologies such as biosensors, implantable devices, advanced signal processing methods and the use of artificial intelligence for diagnostics. Collaboration between physicians and engineers is key to improving patient care and enabling the development of effective treatments. This article focuses on the role of biomedical engineers in cardiology, their professional status in the Czech health care system and the future challenges of the field.

Key words: biomedical engineering, cardiology, cardiovascular technology, telemedicine, artificial intelligence, augmented Reality, 3D printing.

Úvod

V rozvinutých zemích postoupily technologické inovace takovým způsobem, že se promítly téměř do všech oblastí našeho života, zejména v oblasti medicíny a poskytování zdravotní péče. Ačkoli má medicína

jako taková dlouhou historii, vznik technologicky vyspělého systému zdravotní péče, který umožňuje poskytování širokého spektra účinných diagnostických a terapeutických postupů, je relativně nedávným fenoménem. Klíčovým milníkem v tomto vývojovém pro-

DECLARATIONS:

Declaration of originality:

The manuscript is original and has not been published or submitted elsewhere.

Ethical principles compliance:

The authors attest that their study was approved by the local Ethical Committee and is in compliance with human studies and animal welfare regulations of the authors' institutions as well as with the World Medical Association Declaration of Helsinki on Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects adopted by the 18th WMA General Assembly in Helsinki, Finland, in June 1964, with subsequent amendments, as well as with the ICMJE Recommendations for the Conduct, Reporting, Editing, and Publication of Scholarly Work in Medical Journals, updated in December 2018, including patient consent where appropriate.

Conflict of interest and financial disclosures:

None.

Funding/Support:

Podpořeno z MZ ČR – RVO (FNBr, 65269705) a SV MUNI/A/1626/2023.

Cit. zkr: Interv Akut Kardiolog. 2024;23(2-3):110-118

<https://doi.org/10.36290/kar.2024.023>

Článek přijat redakcí: 15. 9. 2024

Článek přijat po přepracování: 31. 10. 2024

Článek přijat k tisku: 18. 11. 2024

Monika Míková

monika.monika@fnbrno.cz

cesu bylo zakládání fakultních výzkumných nemocnic jako center technologicky pokročilé zdravotní péče.

S dramatickým vlivem technologií na zdravotní péči se inženýři začali aktivně podílet na mnoha lékařských projektech. To vedlo k rozvoji oboru biomedicínského inženýrství, který funguje jako integrační médium pro dvě dynamické oblasti – medicínu a inženýrství, a přináší nástroje (jako jsou biosenzory, biomateriály, zpracování signálů a umělá inteligence), které mohou zdravotničtí profesionálové využívat při výzkumu, diagnostice a léčbě (1).

Biomedicinští inženýři se tak stali relativně novými členy týmů zdravotní péče, kde přináší nová řešení pro složité problémy, s nimiž se moderní medicína potýká (2).

Historie biomedicínského inženýrství v kardiologii se píše již několik desetiletí a přirozeně se pojí s potřebou a rozvojem diagnostických a terapeutických metod využívajících jak stále pokročilejší přístupy, tak techniku a technologie. Ve srovnání s jinými inženýrskými disciplínami je však biomedicínské inženýrství relativně nové. Mnoho světově uznávaných autorit vstoupilo do oboru s tituly z jiných inženýrských oborů. Ať už se biomedicinští inženýři zabývají jakoukoliv sub-specializací, vždy jde o spolupráci v týmech s lékaři, sestrami, techniky a dalšími, kteří se podílejí na medicínské praxi. Kromě vývoje technologií a aktivní práce s pacienty jsou velmi aktuální vědeckovýzkumné aktivity, kde se s rozvojem výpočetní techniky otevírá prostor pro sofistikované analýzy, modelace a vytěžování patientských dat. V kardiologii je tomu tak například u výzkumu elektrokardiogramu (EKG).

V tomto článku chceme poukázat na úzkou a stále neoddělitelnější symbiotickou vazbu tohoto oboru s medicínou a s lékařským personálem. Zdůrazňujeme klíčové role biomedicínských inženýrů a nabízíme pohled na profesní postavení a budoucí možnosti tohoto dynamického oboru. Publikace je určena lékařům, kteří jsou ne vždy dostatečně srozuměni s možnostmi a potenciálem biomedicínského inženýrství a možnými kompetencemi biomedicínských či klinických techniků a inženýrů, tak s jejich absolvovaným vzděláním – především s dobrým medicínským základem.

Dále pak může posloužit zájemcům o vzdělání v oboru biomedicínského inženýrství, odborné veřejnosti či managementu zdravotnických zařízení. Text shrnuje stěžejní oblasti, kde je využití biomedicínského inženýrství v kardiologii aktuální.

Těžiště diskutovaných povolání v prostředí českých nemocnic tvoří biomedicinští technici a inženýři, tedy technicko-medicínské vzdělání zdravotničtí profesionálové s úplným vysokoškolským vzděláním dle aktuálního znění zákona 96/2004 Sb., resp. 201/2017 Sb.

Co je to vlastně biomedicínské inženýrství?

Především interdisciplinární obor, aplikující inženýrské postupy v medicíně pro komplexní účely zdravotní péče zahrnující diagnostiku, terapii a jejich výzkum. Kromě slušného medicínskému základu využívá znalosti prvků elektrotechniky, fyziky, strojírenství, biologie, chemie, materiálových věd, matematiky a počítačových věd. Obor je široký a nabízí mnoho specializací i mimo kardiologii, jako jsou například biomechanika, biomateriály, tkáňové inženýrství, genetické inženýrství, neuroinženýrství, farmaceutické inženýrství.

Biomedicinští inženýři se kromě zdravotnických zařízení uplatňují v akademické sféře, průmyslu, vládních organizacích, a jejich práce má stěžejní vliv na vývoj nových medicínských technologií a zařízení (3, 4).

Studium a specializační vzdělávání

V České republice existuje několik univerzit, kde lze studovat biomedicínské inženýrství. Mezi školy nabízející tento obor patří: České vysoké učení technické v Praze (5, 6), Vysoké učení technické v Brně (7), Technická univerzita Liberec (8), nebo Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (9). Tyto instituce poskytují kvalitní vzdělání v oblasti biomedicínského inženýrství, přičemž nabízejí různé specializace, které umožňují studentům zaměřit se na konkrétní oblasti, jako jsou lékařské přístroje, biomedicínská informatika nebo biokybernetika. Studium biomedicínského inženýrství je vždy vázáno jak na technickou univerzitu, tak na odpovídající lékařskou fakultu, kde se vyučuje medicínská část kurikula. Jako konkrétní příklad uvedme spojení

Ústavu biomedicínského inženýrství Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií Vysokého učení technického v Brně s Lékařskou fakultou Masarykovy univerzity. Studijní plán a struktura předmětů tak zahrnuje technické a medicínské předměty. Z technických předmětů studenti absolvují obecné předměty jako jsou matematika, fyzika, a dále pak předměty zaměřené na elektrotechniku. K takovým předmětům patří slaboproudá a silnoproudá elektrotechnika, elektrické systémy a měření, mikroprocesorová technika, algoritmy a programování a jiné.

Studenti získávají také velmi dobrý přehled v oblasti medicíny. Mezi obecné medicínské předměty patří anatomie, fyziologie a patofyziologie člověka, biochemie, molekulární biologie, radiologie a nukleární medicína, biofyzika, první pomoc, klinická medicína, zdravotnická etika, zdravotnická legislativa a právo, epidemiologické modely a další.

Spojení technických a medicínských znalostí pak umožňuje studentům orientovat se ve specializovaných předmětech, jako jsou bioinformatika, biostatistika, zpracování signálů a obrazů, umělá inteligence v medicíně, biosenzory či chemoinformatika (10, 11).

V praxi je možné setkat se s termíny biomedicínský technik, biomedicínský inženýr či klinický inženýr. Rozdíl mezi těmito třemi profesemi definuje Zákon č. 96/2004 Sb. ve znění pozdějších předpisů (201/2017 Sb.), konkrétně § 20 – Odborná způsobilost k výkonu povolání biomedicínského technika, § 27 – Odborná způsobilost k výkonu povolání biomedicínského inženýra a § 57 – Specializační vzdělávání zdravotnických pracovníků způsobilých k výkonu zdravotnického povolání po získání odborné a specializované způsobilosti (12).

Biomedicínský inženýr, který se chce dále specializovat v kardiologii, má několik možností navazujícího vzdělávání. Jednou z takových možností je specializační vzdělávání v oboru klinické inženýrství. Toto vzdělávání je určeno inženýrům, kteří chtějí rozšířit své kompetence v oblasti zdravotnických technologií, včetně kardiologických zařízení. Specializační vzdělávání „Technická podpora v kardiologii, kardiochirurgie a cévní chirurgie“ je organizováno Institutem postgraduálního vzdělávání ve zdravotnictví a je zakončeno státní atestační zkouškou (13).

Další možností vzdělávání jsou specializované kurzy, které v rámci elektrofyziologie, kardiostimulační techniky, echokardiografie a invazivní kardiologie nabízejí někteří výrobci zdravotnických přístrojů a technologií, či autority jako je European Society of Cardiology (ESC) či American Heart Association (USA) (14, 15). Existují také možnosti mezinárodní certifikace, jako jsou školení a semináře organizované zahraničními odbornými institucemi nebo výrobci zdravotnických technologií (16–19). Účast na mezinárodních konferencích, jako jsou ty pořádané Heart Rhythm Society (USA) nebo ESC (Evropa), poskytuje přístup k nejnovějším poznatkům a technologiím v kardiologii (20, 21). V České republice od roku 2017 působí pracovní skupina KardioTech (v rámci České kardiologické společnosti). Tato pracovní skupina je zaměřena především na biomedicínské inženýry v kardiologické praxi, avšak členem se může stát jakýkoliv člen České kardiologické společnosti. To se také děje a členy jsou lékaři se zájmem o techniku a technologie v kardiologii, odborné sestry či odborní zaměstnanci firem spolupracující s kardiologickými pracovišti. PS KardioTech si klade za cíl vytvořit komunikační platformu pro sdílení a šíření aktuálních odborných a organizačních informací, nastavit podporu spolupráce s ostatními spřízněnými společnostmi a pracovními skupinami na národní i nadnárodní úrovni. Zajišťuje oficiální zastoupení biomedicínských profesí při jednáních ČKS a podílí se na úpravách kvalifikačního, specializačního a celoživotního vzdělávání v příbuzných biomedicínských oborech.

Důležitým bodem činnosti je podpora účasti biomedicínských profesí na klinické praxi, výzkumných projektech a jejich publikačních výstupech. S tím je úzce spjata organizace paralelních sekcí na kongresech ČKS a samostatných národních a mezinárodních konferencích zaměřených na vzdělávání a prezentaci výsledků klinické a vědecké práce.

Také zajišťuje efektivní využití a distribuci fondů ČKS a ESC určených k podpoře účasti odborných pracovníků v kardiologii a v kardiokirurgii na národních i mezinárodních kongresech, organizaci a asistenci při realizaci vědeckých stáží doma i v zahraničí.

Pracovní skupina dále rozvíjí interdisciplinární spolupráci a zapojování nových profesí

do systému zdravotnické péče, prezentuje a popularizuje zastoupené obory u odborné i laické veřejnosti. Jednou ze zásadních priorit je postupné zvyšování postavení a prestiže biomedicínských profesí v pracovním prostředí a také posilování vlivu vysoce odborných nelékařských členů v rámci ČKS (22).

Řada biomedicínských inženýrů pokračuje postgraduálním vzděláváním – doktorským studiem na technických, ale i lékařských fakultách. Konkrétním příkladem může být opět Lékařská fakulta Masarykovy univerzity, která zdravotníkům v rolích biomedicínských inženýrů nabízí studium Ph.D. programů za identických podmínek jako lékařům (např. Vnitřní lékařství se specializací Kardiologie) (23). Následně a přirozeně tito absolventi s doktorskými tituly nalézají uplatnění také v akademické sféře obou typů univerzit.

Elektrofyziologie a kardiostimulační technika

Práce biomedicínského inženýra je v elektrofyziologické laboratoři nezastupitelná. Elektrofyziologická laboratoř je specializované pracoviště, kde dochází k diagnostice a léčbě srdečních arytmií metodou, která se nazývá katérová ablace. Na pracovišti je zapotřebí zkušený tým, který zahrnuje lékaře, zdravotní sestry, biomedicínské inženýry, čím dál častěji i anesteziologický tým. Lékař během výkonu zavádí speciální diagnostické a ablační katetry do cílových srdečních oddílů, následně interpretuje nálezy, rozhoduje o podání léků a řídí katérovou ablací. Biomedicínský inženýr je lékařova pomyslná pravá ruka a obsluhuje zařízení laboratoře, jako je stimulátor, generátor ablační energie, ultrazvuk a další přístroje a rovněž se podílí na interpretaci nálezů a návrhů postupu. Inženýr rovněž obsluhuje 3D mapovací systém, který je třeba pro vytvoření mapy daného srdečního oddílu, a EKG registrační systém, jenž zobrazuje signály povrchového EKG a intrakardiálního elektrogramu. V případě potřeby může být inženýr nápomocný na sále, většinu času však z prostředí ovladovny řídí zmíněné technologie. Mezi nejpoužívanější 3D mapovací systémy v elektrofyziologii patří CARTO® (Biosense Webster, Irvine, California, USA), EnSite™ (Abbott, Chicago, Illinois, USA) a Rhythmia™ (Boston Scientific, Marlborough, Massachusetts, USA).

V minulosti byly katérové ablace v kardiologii prováděny především lékařem a sestrou, kteří se starali o pacienta a zajišťovali hladký průběh zákroku. S rozvojem moderních technologií se však situace výrazně změnila. Dnešní komplexní vybavení a nové technologie vyžadují odborné znalosti biomedicínského inženýra. S vývojem technologií pro katérovou ablací se výrazně rozšířily i samotné metody. Původně byla standardem radiofrekvenční ablace, která využívá vysokofrekvenční elektrický proud k vytváření tepla a modifikace nežádoucích tkání odpovědné za vznik a udržení arytmiie. Postupem času se začaly využívat i další formy ablační energie. Mezi ně patří kryoablace, která využívá extrémní chlad, laserová ablace umožňující přesné zaměření energie, a ultrazvuková ablace (24). V současné době se největšího zájmu těší ablace pulzním polem – elektroporace, která slibuje vyšší bezpečnost a efektivitu díky svému šetrnému působení na okolní tkáň, přičemž selektivně účinkuje pouze na myokard. Při těchto výkonech lze k lokalizaci katétrů využít intrakardiální echokardiografii (ICE), což je ultrazvuková sonda zavedená přímo do srdce pacienta. ICE poskytuje detailní vizualizaci srdečních struktur v reálném čase, což umožňuje lékaři přesněji a bezpečněji se orientovat uvnitř srdce a lépe cílit ablační energii při současném snížení dávky rentgenového záření. Díky technické zdatnosti a odborným znalostem biomedicínského inženýra je zajištěna optimální kvalita obrazu a bezpečný průběh zákroku, což přispívá k vyšší efektivitě a bezpečnosti celé procedury.

Na implantačním sále obvykle probíhají implantace kardiostimulátorů, implantabilních kardioverterů-defibrilátorů (ICD) či jiných záznamových zařízení do těla pacienta. K tomuto výkonu je opět zapotřebí zkušený tým složený z lékaře, sestry a biomedicínského inženýra. Lékař je za celý výkon zodpovědný, zavádí elektrody do srdečních oddílů, rozhoduje o podání medikace a umísťuje přístroj do těla pacienta. Práce inženýra spočívá v obsluze elektrofyziologického systému, provádění a vyhodnocování měření. Dále provádí programování kardiostimulátoru či ICD pomocí programátoru, na kterém je možné volit dané parametry tak, aby byl přístroj pacientovi co nejvíce ku prospěchu. Inženýr by měl být

následně schopný samostatně kontrolovat pacientův přístroj během hospitalizace a během pravidelných kontrol v arytmologické ambulanci. Taktéž provádí kontroly implantovaných přístrojů u pacientů na různých odděleních nemocnice. Obvykle se sledují stimulační parametry, kapacita baterie, dysfunkce přístroje či záznamy arytmií. Práce inženýra zahrnuje nejen fyzické kontroly, ale také sledování pacientů prostřednictvím volitelné dálkové monitorace, která umožňuje kontinuální dohled nad stavem přístroje i pacienta (25). Veškeré zjištěné údaje a výsledky těchto kontrol následně potvrzuje lékař, který na jejich základě může rozhodnout o dalším postupu v péči o pacienta.

Echokardiografie v moderní diagnostice

Ačkolí není nasazení biomedicínských inženýrů v oblasti echokardiografie tak rozšířené jako například v elektrofyziologii, v České republice lze pozorovat rostoucí trend jejich začleňování do týmů na pracovištích neinvazivní kardiologie. Jednou z jejich klíčových rolí je obsluha a konfigurace echokardiografických přístrojů, jejich údržba, propojení s informačními systémy nemocnice a přímé provádění transthorakální echokardiografie (TTE). TTE je neinvazivní zobrazovací metoda, která umožňuje detailní pohled na strukturu a funkci srdce pomocí ultrazvuku. Toto vyšetření poskytuje informace o velikosti srdce, síle srdečních stěn, funkci srdečních chlopní a průtoku krve (26, 27). V moderní echokardiografii se stále více využívají pokročilé technologie, jako je strain imaging, který umožňuje detailnější hodnocení deformace srdečního svalu, což vede k lepší diagnostice různých kardiomyopatií a například k přesnějšímu hodnocení srdeční funkce před a po onkologické léčbě (28). Alternativou k TTE je transezofageální echokardiografie (TEE), která se používá v případech, kdy je potřeba detailnější zobrazení nebo při vyšetření struktury, které nejsou dostatečně viditelné při transthorakálním vyšetření (29).

Biomedicínský inženýr musí disponovat jak technickými znalostmi o ultrazvukové technologii, tak medicínskými o fyziologii a patologii srdce, aby mohl efektivně spolupracovat s kardiologi nejen při obsluze

přístrojů, ale také při správné interpretaci echokardiografických obrazů, přičemž na několika pracovištích v ČR již samostatně provádí akvizice. Dále díky svému technickému vzdělání přináší biomedicínský inženýr do týmu schopnosti v oblasti správy, optimalizace a aktualizace zdravotnické techniky, což zahrnuje interní zajištění správného provozu přístrojů, řešení akutních technických problémů, a tím zajištění plynulého chodu pracoviště.

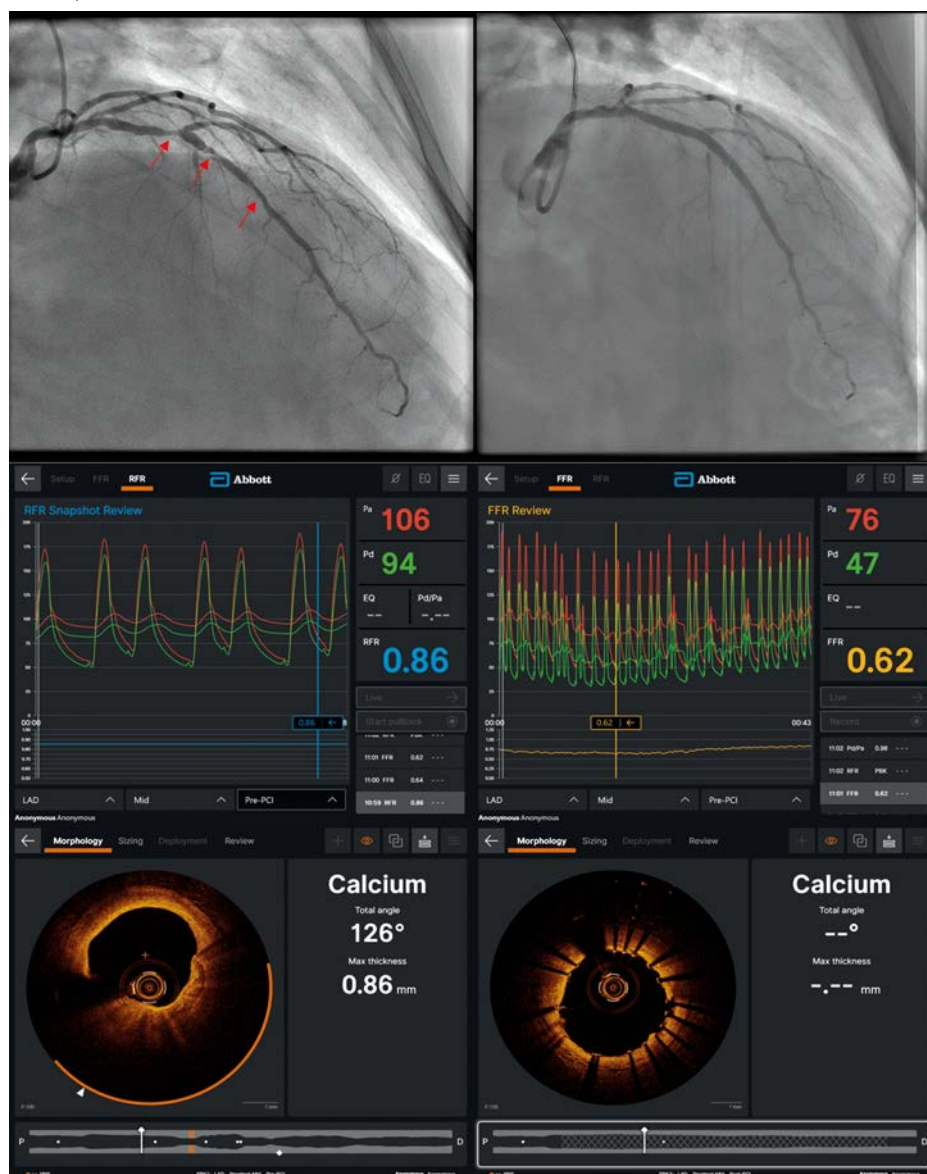
Invazivní a intervenční kardiologie

Z důvodu rapidního technického pokroku napříč celou škálou kardiologických subspecializací nachází biomedicínský inženýr uplatnění i v katetizačním týmu, který provádí srdeční

katetrizace, koronární a nekoronární intervence. S odbornou podporou biomedicínského inženýra se lékař může více zaměřit na techniku provedení zákroků bez nutnosti přítomnosti dalšího kolegy, zatímco sestra zastává asistenci operátora a péči o pacienta přímo na sále. V rámci invazivní a intervenční kardiologie se biomedicínský inženýr věnuje různorodým činnostem a jeho náplň práce je díky akutnímu provozu katetizačních sálů rozmanitá.

V katetizační laboratoři na prvním místě zajišťuje bezproblémový chod zdravotnické přístrojové techniky – participuje při uvedení techniky do provozu, školení pracovníků, vytváření zjednodušených návodů, standardizace práce se specializovanými přístroji a v neposlední řadě řešení technických problémů.

Obr. 1. Levá část: tepna s hraničními změnami 60–70 % ve střední části (šipky) s významným výsledkem funkčního měření (RFR, FFR) a následnou OCT guided PCI s dobrým angiografickým i OCT výsledkem ve stentu (pravá část)



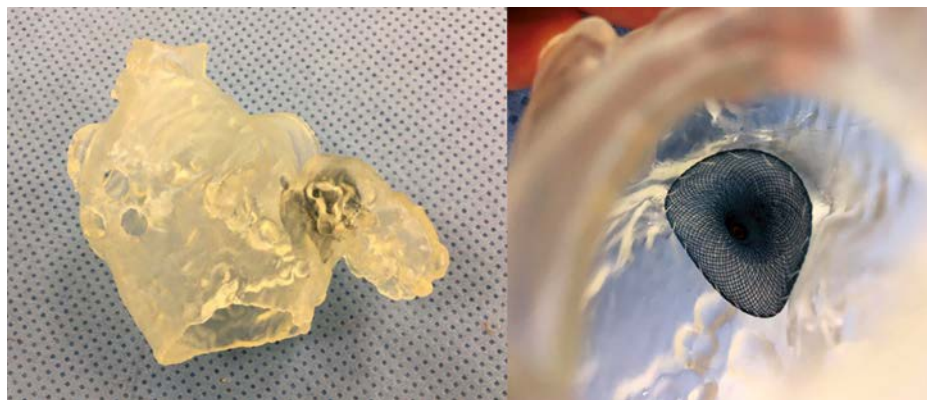
Musí být obeznámen s obsluhou i funkcemi C-ramena pro správné nastavení rentgenového obrazu a hemodynamickým systémem pro měření ejekční frakce levé komory, kvalitativní komparativní analýzy (QCA) při selektivní koronarografii, vyhodnocování pravostranné katetrizace, termodilučního měření apod.

Důležitou úlohou je práce biomedicínského inženýra při měření během komplexních perkutánních koronárních intervencí (PCI) s využitím funkčního vyšetřování koronárních tepen pomocí hyperemických a nehyperemických indexů pro ozřejmění nejednoznačných stenóz či vyšetření mikrocirkulace (30). Přidanou hodnotu k angiografii navíc získávají doplňkové zobrazovací metody – optická koherentní tomografie (OCT), intravaskulární ultrazvuk (IVUS), spektroskopie pomocí blízkého infračerveného záření (NIRS), využívající pohled dovnitř tepny speciálním zobrazovacím katétre. Mohou se tak odhalit kalcifikace, fibrotické změny, lipidové pláty, disekce a jiné změny uvnitř koronárních tepen. Použití zobrazovacích metod a měření přesných rozměrů tepen, u čehož je biomedicínský inženýr důležitým prvkem, pomůže lékaři se správnou strategií provedení zákroku, s výběrem místa a velikostí implantovaného stentu nebo balonku. Měření s pomocí RFR, FFR a využitím OCT ilustruje obrázek 1 (31).

Katetrizační uzávěr ouška levé síně řadí se mezi nekoronární intervence se provádí u pacientů s přetrvávající fibrilací síní a krvácivými komplikacemi nutné antikoagulační terapie. Trendem v současné době je příprava modelu ouška a jeho tisk na 3D tiskárně pro přesnější plánování výkonu. Pokud pacient nemá kontraindikace, provádí se kontrastní CT vyšetření srdce. Data z CT jsou následně segmentována a upravena dle potřeb operátora. Na fyzickém 3D modelu následně lékař zkouší přístupové cesty k oušku reálným instrumentáři a s různými velikostmi okluderů. Ukázku tištěného modelu levé síně se zavedeným okluderem dokládá obrázek 2.

Další možností pro rozměrování ouška levé síně je software 3mensio využívající stejná CT data, jako u 3D tisku. Na základě daných kritérií je změřeno ostium a cílová oblast – „landing zone“ pro umístění okluderu. Software umožňuje vizualizaci jeho tvaru ve 3D zobrazení a při skiagrafii nástřikem kon-

Obr. 2. 3D model levé síně se zavedeným okluderem v oušku levé síně



trastní látkou. Na základě měření biomedicínského inženýra je následně doporučena velikost okluderu. Tato aplikace se také využívá pro měření před dalšími nekoronárními intervencemi – transkatérová implantace aortální chlopně (TAVI), oprava/náhrada mitrální chlopně (MVR) a jiné (32).

Součástí našeho pracoviště je od roku 2019 Kardiovaskulární simulační centrum Kardiosim, které jako první sloužilo pro postgraduální výuku lékařů v oboru kardiologie v České republice. Výhodou simulátoru je vyzkoušet si katetrizaci, naučit se postupům a zvládnutí simulovaných komplikací pod vedením zkušených intervenčních kardiologů bez rentgenového záření. Pracovní náplní biomedicínského inženýra je zajištění simulačního instrumentária a výukových materiálů, pořádání vzdělávacích akcí pro studenty a lékaře, aktualizace novinek na webových stránkách, spolupráce na vytváření harmonogramu lekcí, zajišťování podkladů pro lékaře a údržba simulátoru. Dnes simulační centrum organizuje výukové akce zaměřené na základy koronarografického vyšetření, PCI a jejich komplikace a strukturální intervence. Dále slouží v rámci předatestační přípravy pro lékaře z našeho pracoviště (33, 34).

Využití telemedicíny v kardiologii

Telemedicina umožňuje prostřednictvím digitálních technologií poskytování zdravotní péče na dálku. V posledních letech se stává klíčovým nástrojem v části zdravotnictví a pacienti mohou získat kvalitní péči i v situacích, kdy není fyzický kontakt s lékařem dostupný. Její význam vzrůstá zejména v oblasti kardiologie, kdy může výrazně přispět k včasné diagnostice, monitorování a léčbě pacientů se srdečními

onemocněními. Biomedicínský inženýr zde působí jako mediátor mezi vyhodnocovacími databázemi a lékaři. Díky technickým i medicínským znalostem dokážou poukázat na případy, kdy je nutný zásah lékaře, řešit konzultace s výrobcem zařízení či určit, kdy je u aktivních implantátů třeba časné zasáhnout do nastavení přístroje. V současné době se telemedicina využívá především v těchto oblastech:

Monitorování srdečního rytmu – dlouhodobé kontinuální sledování reálného EKG pacienta v domácím prostředí, a to v horizontu dnů až měsíců. Toto sledování je možné především díky miniaturizaci samotných EKG přístrojů, tak i díky rozvoji nositelných zařízení např. typu chytrých hodinek. Tým biomedicínských inženýrů hraje nezastupitelnou roli ať už v samotném fyzickém hodnocení kontinuálních EKG záznamů, tak i při vývoji a implementaci algoritmů umělé inteligence (AI) a zajištění bezproblémového napárování jednotlivých zařízení. Díky online sledování tým může promptně reagovat na poruchy rytmu a pacientovi naplánovat další terapii (35).

Telemedicínská kontrola kardiologických implantabilních elektronických přístrojů (CIED) – umožňuje dálkový odečet parametrů a holterovských funkcí z implantabilních přístrojů a zvyšuje tak bezpečnost a účinnost terapie. Dříve bylo k telemonitoringu využíváno externích modemů, dnešní rychlý vývoj hardware i obslužného software již umožňuje kontrolu CIED pomocí pacientova mobilního telefonu s nainstalovanou mobilní aplikací. Role biomedicínského inženýra je právě v denní kontrole alarmů a jednotlivých hlášení a minimalizaci komplikací ať už z arytmiologické příčiny, nebo z technického selhání elektrody či přístroje. S rychlým vývojem AI můžeme očekávat, že tyto funkce budou moci predi-

kovat rizikové události a na základě analýzy vzorků srdečního rytmu časně upozornit na pacienty s rizikem závažné arytmie (36).

Sledování pacientů se srdečním selháním – se využívá především u nově diagnostikovaných pacientů, jako součást edukace a nastavení terapie, nebo u pacientů s vysokým rizikem opakovaných hospitalizací. V rámci kontinuálních sledování se kombinují parametry různých zařízení (CIED, chytré hodinky, glukometry, tlakoměry) umožňující online přenos dat. Na základě znalosti anamnézy a parametrů fyziologických funkcí (glykemie, krevní tlak, EKG, pohybová aktivita, výška, váha) biomedicínský tým ve spolupráci s lékaři může personalizovat farmakoterapii v domácím prostředí pacienta a zároveň motivovat pacienta k edukaci o managementu jeho chronického onemocnění a zabránění tak zhoršení jeho zdravotního stavu. Opět, implementace AI umožní reagovat na zhoršení stavu dříve, než dojde ke klinickým příznakům (37).

3D tisk v kardiologii

3D tisk je technologie, která umožňuje vytvářet fyzické modely na základě digitálních dat získaných nejčastěji z CT, dále také z magnetické rezonance (MRI), nebo ultrazvukových skenů. V kardiologii nachází 3D tisk široké uplatnění, především v oblasti personalizované medicíny. Jedním z nejdůležitějších aspektů je možnost vytváření přesných modelů pacientova srdce, které slouží k detailní analýze složitých anatomických struktur. Tyto modely jsou neocenitelné při plánování náročných zákroků, například, jak již bylo zmíněno při zavádění okluderů, výkonech na srdečních chlopních, nebo při léčbě vrozených srdečních vad. Biomedicínský inženýr využívá svých technických a medicínských znalostí ke správné segmentaci surových 3D dat, volby metody 3D tisku a jeho samotného provedení. Výsledkem je nejčastěji fyzický, anatomicky korektní model – předloha, podle které následně lékař plánuje konkrétní výkon za užití adekvátního instrumentária a postupů.

Dalším významným přínosem 3D tisku je vývoj personalizovaných implantátů a zdravotnických nástrojů. Díky možnosti přizpůsobit implantáty přesně anatomii pacienta se zvyšuje jejich efektivita a snižuje riziko komplikací. Například personalizované stenty nebo srdeční

chlopně tištěné na míru mohou lépe adresovat specifické potřeby pacienta, následně pak tento přístup vede k lepším dlouhodobým výsledkům. Biomedicínský inženýr i zde využívá svých technických a medicínských znalostí ke správné segmentaci surových 3D dat, volby metody 3D tisku a jeho samotného provedení (38).

Kromě přímé klinické aplikace hraje 3D tisk významnou roli také ve výzkumu, vývoji a vzdělávání. Výzkumné týmy využívají 3D tištěné modely k výuce, experimentování s novými léčebnými postupy, testování nových materiálů a vývoji pokročilých biokompatibilních implantátů. V budoucnu by mohl 3D tisk dokonce umožnit výrobu funkční srdeční tkáně nebo celých orgánů. Biomedicínská inženýři zde vyvíjejí modely, postupy a participují na výuce (39–41).

V rámci 3D tisku naše pracoviště, tedy Interní kardiologická klinika Fakultní nemocnice Brno, aktivně spolupracuje s firmou Prusa Research, a. s., která je uznávaným světovým výrobcem a vývojářem 3D tiskáren a pokročilých tiskových materiálů. Jsme iniciátory vzniku Centra inovací FN Brno právě se strategickým partnerem Prusa Research, a. s.

Rozšířená realita v kardiologii

Rozšířená realita, virtuální realita a smíšená realita jsou technologie, které propojují reálný svět s digitálním obsahem a poskytují nové způsoby interakce s komplexními daty. V kardiologii nacházejí tyto technologie uplatnění především ve vzdělávání, postgraduálním tréninku a plánování operací. Biomedicínská inženýři zde opět využívají jak technického, tak medicínského odborného vzdělání pro management složité techniky, segmentaci, vývoj aplikací a medicínsky korektní přípravy dat. Dále se fyzicky účastní výkonů, kde zajišťují hladký průběh vizualizace pro potřeby operátora.

Augmentovaná realita (AR) umožňuje lékařům zobrazit digitální informace přímo na těle pacienta, například promítáním anatomických struktur do anatomicky odpovídajícího prostoru během zákroku. Tím se zlepšuje přesnost operací a umožňuje se efektivní navigace během složitých intervencí. AR také usnadňuje komunikaci mezi operačními týmy, protože všechny zapojené strany mohou vidět stejná data v reálném čase.

Virtuální realita (VR) nachází využití především v tréninku lékařů a studentů medicíny. VR umožňuje vytvořit realistické simulace operačních zákroků, které lze opakovaně nacvičovat bez rizika pro pacienta. Tento typ tréninku zvyšuje připravenost lékařů na skutečné situace, zlepšuje jejich dovednosti a odráží se v nižší míře komplikací a vyšší úspěšnosti zákroků.

Smíšená realita (MR) kombinuje prvky AR a VR a umožňuje interakci s virtuálními objekty ve fyzickém prostoru. V kardiologii se MR používá například pro vytváření komplexních simulací, kde mohou lékaři manipulovat s digitálními modely srdce přímo ve svém pracovním prostředí. Využití se přímo nabízí pro plánování operací, distanční spolupráci a vývoj nových terapeutických postupů.

Tyto technologie také výrazně přispívají k individualizaci léčby. S využitím rozšířené reality mohou zdravotničtí profesionálové lépe porozumět specifickým potřebám každého pacienta a navrhnout léčebné postupy šité na míru. Pro pacienty jsou tyto technologie přínosem v personalizovanější, efektivnější, a tím pádem i úspěšnější péči, jak dokládají současné publikace (42–46).

3D tisk a rozšířená realita představují revoluční nástroje v současné kardiologii, které posouvají hranice toho, co je možné v oblasti diagnostiky, léčby, vzdělávání i výzkumu. Personalizované modely a implantáty vytvářené pomocí 3D tisku, spolu s pokročilými aplikacemi AR, VR a MR, přinášejí vyšší přesnost a efektivitu do klinické praxe a zlepšují tak výsledky léčby a celkovou kvalitu péče o pacienty s kardiovaskulárními onemocněními. Tyto technologie zároveň umožňují lépe porozumět složitým srdečním stavům a poskytují nové možnosti pro výzkum a vývoj budoucích terapeutických postupů. Využití 3D tisku a rozšířené reality v kardiologii tedy představuje nejen aktuální trend, ale také významný krok směrem k moderní, precizní a personalizované medicíně. Vzhledem ke komplexitě, potřebě interdisciplinárního rozhledu a spolupráce jsou biomedicínská inženýři nezastupitelní v efektivním využití těchto technologií.

Další specializované odvětví

Číslicové zpracování signálů a obrazů, AI a strojové učení hrají klíčovou roli v moderní

kardiologii. Biomedicínská inženýři mohou znovu významným způsobem využít své teoretické i praktické znalosti v těchto oblastech k inovativnímu výzkumu a klinickým aplikacím. Z podstaty svého multioborového vzdělání aplikují znalosti programování, analýzy, algoritmy a vizualizace na konkrétních případech, jako je například EKG, které dokážou solidně uchopit díky medicínskému základu.

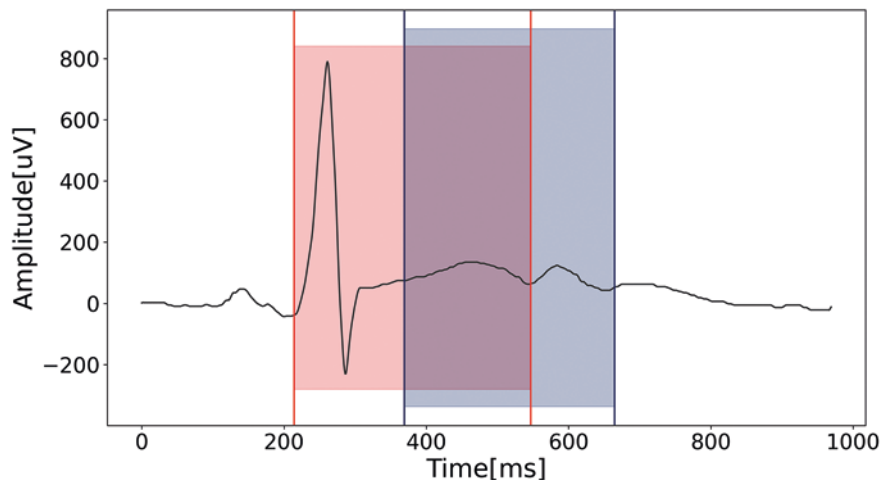
Jedním z významných přínosů číslicové analýzy signálu je pokročilá detekce složitých vzorců v elektrokardiogramech, jako je například QRS mikrofragmentace. QRS mikrofragmentace umožňuje identifikovat abnormality v depolarizaci myokardu, které nejsou vizuálně rozpoznatelné na standardních 12svodových EKG. QRS mikrofragmentace se ukázala jako nezávislý prediktor úmrtnosti u pacientů s kardiovaskulárními onemocněními (47).

Dalším příkladem může být analýza vlastností vlny U, která dosud není plně pochopena a zůstává předmětem výzkumu (48–50). V některých studiích bylo pozorováno, že vlna U může ovlivnit QT interval a komplikuje jeho správnou interpretaci (51). Biomedicínský inženýr může využít své matematické a medicínské znalosti ke zkoumání tohoto jevu. Příkladem je ukázka ze softwaru analyzujícího superpozici vln T a U s rozměřením QT intervalu na obrázku 3.

V oblasti zpracování obrazů a algoritmu hlubokého učení je možné provádět automatickou sémantickou segmentaci srdečních struktur, například z echokardiografických snímků, v reálném čase. Tato technika poskytuje lékařům lepší a přesnější vizualizaci srdce, například při hodnocení funkce levé komory a jejího objemu. Přínos biomedicínské inženýra je právě aplikace konkrétních metod na tyto signály, kterým dobře rozumí po technické i medicínské stránce (52–54).

Vývoj nemocničních informačních systémů je klíčový pro bezproblémovou agregaci dat z různých pracovišť, diagnostických zařízení, zobrazovacích metod a systémů pro správu pacientů. Biomedicínská inženýři mohou hrát klíčovou roli při vývoji a integraci těchto systémů, kdy využívají svoje znalosti chodu pracoviště, a kromě vlastního zapojení do tvorby software programováním svedou efektivně komunikovat odborné potřeby lékařského, nelékařského i technického personálu nemocnice – obrázek 4

Obr. 3. Ukázka ze softwaru vyvinutého biomedicínskými inženýry na IKK FN Brno zkoumající vliv U vlny na QT interval. Za QRS následuje vlna T v superpozici s vlnou U. Software analyzuje jejich rozložení a odhaduje reálný QT interval



Obr. 4. Pracovní verze KIS vytvořená biomedicínskými inženýry IKK FN Brno

K

Prof. MUDr. Jan Novák PhD.

Nastavení účtu

Seznam pacientů

John Doe 9707221...

+

Najít pacienta:

Seznam 30 nově přidaných

Přidat nového pacienta

Seznam výkonů

Seznam uživatelů

Ostatní seznamy

Nastavení účtu

Odhlásit se

Jméno

Roční číslo

Datum narození

Telefonní číslo

Datum změny

Změnu provedl

Donny Alexander

90090/17777

01.09.1990

+420 777 777 777

13.3.2024 8:15:24

MUDr. Petr Novák

Sherrine Hawkins

90090/17777

01.09.1990

+420 777 777 777

13.3.2024 8:15:24

MojzePezdivka

Rigoberto Sawyer

90090/17777

01.09.1990

+420 777 777 777

13.3.2024 8:15:24

MUDr. Petr Novák

Bette Harrington

90090/17777

01.09.1990

+420 777 777 777

13.3.2024 8:15:24

MUDr. Petr Novák

Abraham Dudley

90090/17777

01.09.1990

+420 777 777 777

13.3.2024 8:15:24

MUDr. Petr Novák

Thalia Pittre

90090/17777

01.09.1990

+420 777 777 777

13.3.2024 8:15:24

MUDr. Petr Novák

Bill Luckey

90090/17777

01.09.1990

+420 777 777 777

13.3.2024 8:15:24

MUDr. Petr Novák

Bennett Eastman

90090/17777

01.09.1990

+420 777 777 777

13.3.2024 8:15:24

MojzePezdivka

Hermila Laporte

90090/17777

01.09.1990

+420 777 777 777

13.3.2024 8:15:24

MUDr. Petr Novák

Angelita Braden

90090/17777

01.09.1990

+420 777 777 777

13.3.2024 8:15:24

MUDr. Petr Novák

Gene Larsen

90090/17777

01.09.1990

+420 777 777 777

13.3.2024 8:15:24

MUDr. Petr Novák

Domenic Guerrero

90090/17777

01.09.1990

+420 777 777 777

13.3.2024 8:15:24

MUDr. Petr Novák

Adriana Hawes

90090/17777

01.09.1990

+420 777 777 777

13.3.2024 8:15:24

MUDr. Petr Novák

Gino Pickard

90090/17777

01.09.1990

+420 777 777 777

13.3.2024 8:15:24

MojzePezdivka

Carol Metzger

90090/17777

01.09.1990

+420 777 777 777

13.3.2024 8:15:24

MUDr. Petr Novák

Merrill Granados

90090/17777

01.09.1990

+420 777 777 777

13.3.2024 8:15:24

MUDr. Petr Novák

Adelle Tracy

90090/17777

01.09.1990

+420 777 777 777

13.3.2024 8:15:24

MUDr. Petr Novák

Drew Head

90090/17777

01.09.1990

+420 777 777 777

13.3.2024 8:15:24

MUDr. Petr Novák

Minimalizovat

Zobrazit historii změn

ukazuje vlastní vyvíjený informační systém IKK FN Brno. Propojením klinického informačního systému (KIS) s ostatními informačními systémy, diagnostickými nástroji nebo zobrazovacími modalitami odpadá nutnost manuálních zásahů, čímž se zrychluje provoz a snižuje chybivost, která může, i významně, zpomalit chod pracoviště (55, 56).

Platové/mzdové podmínky

Zajímavou, ale i citlivou oblastí vyplývající z praxe a uvedených faktů může být také budoucí revize platového/mzdového ohodnocení. Biomedicínské inženýrství ve veřejném nemocničním sektoru je v současnosti řazeno do platových tabulek pro nelékařské zdravotnické obory, jako jsou například zdravotní sestry. V soukromém sektoru se mzdy řídí smluvně. Je tedy zřejmé, že s rostoucími pravomocemi biomedicínských

inženýrů, které jsou v současné době aktuálním tématem, by měla být zvážena revize jejich zařazení do platových tabulek a tříd. Biomedicínský technik (Bc.) je řazen do tříd 10–12, biomedicínský inženýr (Ing.) pak do tříd 11–14 (57). Zařazení daného pracovníka do těchto tříd je dle zkušenosti vedeno zvyklostmi konkrétního pracoviště. Zároveň platí, že získání specializované způsobilosti vede ke zvýšení platové třídy. Na našem pracovišti pracují pouze biomedicínská (klinická) inženýři a ti jsou řazeni do tříd 13 (bez dokončeného specializačního vzdělávání na IPVZ) či 14 (po složení státní atestační zkoušky). Aktualizované platové tabulky lze volně najít na webu (56). Kromě základního tabulkového platu se v platových výměrech objevují příplatky za ztížené pracovní prostředí, příplatek za vedení (pro vedoucí pozice), za příslužby, práci přesčas či osobní ohodnocení.

Biomedicínská inženýři jsou často paralelně studenti doktorského studia v prezenční formě – se stipendiem či jsou výzkumnými členy v různých vědeckých projektech, nebo jsou externí zaměstnanci spolupracujících firem. Toto ale není pravidlem na všech pracovištích a závisí také na osobních preferencích a schopnostech daného jedince. Pro tyto pracovníky může pak základní tabulkový plat být pouze menší částí celkového příjmu.

Nicméně vzhledem k vysoké úrovni kvalifikace, odborných znalostí a stoupající odpovědnosti při reálné práci s pacienty reflektující západní trendy je zcela na místě, aby byla ideálně vytvořena samostatná platová tabulka pro vysoce specializované a odborné zdravotnické profese, která by vedla k celkovému zvýšení atraktivity oboru. Do této tabulky by pak mohly být zahrnuty i další vysokoškolské obory, které, stejně jako biomedicínská inženýři, svým vzděláním a odborností odpovídají blíže lékařům, zubním lékařům či farmaceutům (jenž mají dedikovanou individuální pla-

tovou tabulku) než střednímu zdravotnickému personálu. Mezi tyto obory se přirozeně řadí mimo biomedicínské a klinické inženýry také specializace, jako jsou klinická psychologie, klinická biochemie, klinická genetika, klinická hematologie a klinická logopedie. Tímto způsobem by bylo zajištěno spravedlivé a motivující ohodnocení biomedicínských inženýrů pracujících ve veřejném zdravotnictví a často současně akademické sféře, které by reflektovalo jejich klíčovou roli a vzrůstající odpovědnost v moderním zdravotnictví.

Závěr

Navzdory vysoké úrovni kvalifikace a úkáního pre- i postgraduálního vzdělávání biomedicínských inženýrů, kteří disponují znalostmi v oblasti medicíny, technologií a vědy, jejich pravomoci ve zdravotnictví často neodpovídají jejich odborným schopnostem a reálným možnostem. Zvýšení pravomocí v klinické praxi by nejen umožnilo lepší využití jejich schopností a dovedností, ale také přispělo

k efektivnějšímu fungování zdravotnických týmů a k lepší péči o pacienty při současném zvýšení atraktivity oboru.

Biomedicínské inženýrství jako obor zůstává bohužel často nedostatečně známé mezi ostatními zdravotnickými pracovníky, což může vést k omezenému zapojení těchto odborníků do klinických procesů, přestože jejich přínos pro moderní medicínu je zásadní a vliv biomedicínského inženýrství v medicíně prokazatelně vede k lepším výsledkům léčby v mnoha odvětvích (58, 59).

Je však nutné zmínit, že jde o relativně mladý obor, který se stále dynamicky vyvíjí. Jeho plný potenciál ještě není zcela využit, ale s rostoucím technologickým pokrokem a lepším pochopením jeho přínosu v klinické praxi lze očekávat, že jeho role ve zdravotnictví bude dále posilovat (60).

Poděkování: Rádi bychom vyjádřili upřímné poděkování našim kolegům za jejich cenné připomínky a zpětnou vazbu a během tvorby tohoto textu.

LITERATURA

- Goodman CS. Technology assessment in healthcare: A means for pursuing the goals of biomedical engineering. *Med Biol Eng Comput* [Internet]. 1993 Jan;31(1):HTA3–10. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/BF02446885>.
- Saltzman WM. *Biomedical Engineering* [Internet]. Cambridge University Press; 2015. Available from: <https://www.cambridge.org/highereducation/books/biomedical-engineering/B366AFA95A46F0994485107237F99EE2#contents>.
- Bronzino JD. *Biomedical Engineering*. In: *Introduction to Biomedical Engineering*. Elsevier; 2012. p. 1–33.
- Linsenmeier RA, Saterbak A. Fifty Years of Biomedical Engineering Undergraduate Education. *Ann Biomed Eng*. 2020 Jun 6;48(6):1590–615.
- Fakulta biomedicínského inženýrství. <https://www.fbmi.cvut.cz/cs/home>. 2024 [cited 2024 Oct 29]. Studijní programy Fakulty biomedicínského inženýrství ČVUT v Praze. Available from: <https://www.fbmi.cvut.cz/cs/home>.
- Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze. <https://fel.cvut.cz/cs/studijni-programy/bio-lekarska-elektronika-a-bioinformatika>. 2024 [cited 2024 Oct 29]. Studijní program Lékařská elektronika a bioinformatika. Available from: <https://fel.cvut.cz/cs/studijni-programy/bio-lekarska-elektronika-a-bioinformatika>.
- Ústav biomedicínského inženýrství. <https://www.ubmi.fekt.vut.cz/>. 2024 [cited 2024 Oct 29]. Studijní programy Ústavu biomedicínského inženýrství FEKT VUT v Brně. Available from: <https://www.ubmi.fekt.vut.cz/>.
- Fakulta zdravotnických studií TUL. *Fakulta zdravotnických studií TUL*. 2024 [cited 2024 Nov 21]. *Fakulta zdravotnických studií TUL*. Available from: <https://www.fzs.tul.cz/uchazeci/navazujici-magistersky-studijni-program/biomedicinske-inzenyrstvi>.
- Fakulta elektrotechniky a informatiky. <https://www.studujvostroze.cz/studijni-obory/biomedicinska-technika/>. 2024 [cited 2024 Oct 29]. Studijní programy Fakulty elektrotechniky a informatiky VŠB TUO. Available from: <https://www.studujvostroze.cz/studijni-obory/biomedicinska-technika/>.
- Studijní program Biomedicínské inženýrství a bioinformatika [Internet]. 2024. Available from: <https://www.vut.cz/studenti/programy/program/8919>.
- Studijní program Biomedicínská technika a bioinformatika [Internet]. 2024. Available from: <https://www.vut.cz/studenti/programy/program/8853>.
- ČR P sněmovna. Zákon č. 201/2017 Sb. *Sbírka zákonů* [Internet]. 2017; Available from: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2017-201>.
- Institut postgraduálního vzdělávání ve zdravotnictví. *Institut postgraduálního vzdělávání ve zdravotnictví*. 2024. *Vzdělávací programy v klinickém inženýrství*. Available from: <https://www.ipvz.cz/o-ipvz/kontakty/pedagogicka-pracoviste/klinicke-inzenyrstvi/vzdelavaci-programy>.
- ESC. ESC Certifications. 2024 [cited 2024 Oct 31]. ESC Certifications. Available from: <https://www.escardio.org/Education/Career-Development/Certification>.
- AHA Education. AHA Education. 2024 [cited 2024 Oct 31]. AHA Education. Available from: <https://professional.heart.org/en/education>.
- Medtronic. Medtronic Academy. 2024 [cited 2024 Oct 31]. Medtronic Academy. Available from: <https://www.medtronicacademy.com/cema/home>.
- Boston Scientific. Boston Scientific EDUCARE. 2024 [cited 2024 Oct 31]. Boston Scientific EDUCARE. Available from: <https://www.bostonscientific.com/en-US/education.html>.
- Biotronik. Biotronik Professional Education. 2024 [cited 2024 Oct 31]. Biotronik Professional Education. Available from: <https://www.biotronik.com/en-us/healthcare-professionals/professional-education>.
- Abbott. Abbott Cardiovascular Training & Education. 2024 [cited 2024 Oct 31]. Abbott Cardiovascular Training & Education. Available from: <https://www.abbott.com/vascular/education>.
- AHA. AHA Scientific Sessions. 2024 [cited 2024 Oct 31]. AHA Scientific Sessions. Available from: <https://professional.heart.org/en/meetings/scientific-sessions>.
- ESC. ESC Congresses. 2024 [cited 2024 Oct 31]. ESC Congresses. Available from: <https://www.escardio.org/Congresses-Events/Congresses>.
- PS KardioTech. Česká kardiologická společnost. 2024 [cited 2024 Oct 31]. PS KardioTech. Available from: <https://www.kardio-cz.cz/zakladni-informace-738/>.
- Doktorské studium – Masarykova univerzita, lékařská fakulta [Internet]. 2024. Available from: <https://www.med.muni.cz/veda-a-vyzkum-archiv/doktorske-studium/studijni-programy/23434-vnitri-lekarstvi>.
- Parameswaran R, Al-Kaisey AM, Kalman JM. Catheter ablation for atrial fibrillation: current indications and evolving technologies. *Nat Rev Cardiol*. 2021 Mar 13;18(3):210–25.
- Varma N. Automatic remote home monitoring of implantable cardioverter defibrillator lead and generator function: A system that tests itself everyday. *Europace*. 2013;15(SUPPL.1).
- Mitchell C, Rahko PS, Blauwet LA, et al. Guidelines for Performing a Comprehensive Transthoracic Echocardiographic Examination in Adults: Recommendations from the American Society of Echocardiography. *Journal of the American Society of Echocardiography*. 2019 Jan;32(1):1–64.
- Hillis GS, Bloomfield P. Basic transthoracic echocardiography. *BMJ*. 2005 Jun 18;330(7505):1432–6.
- Plana JC, Galderisi M, Barac A, et al. Expert Consensus for Multimodality Imaging Evaluation of Adult Patients during and after Cancer Therapy: A Report from the American Society of Echocardiography and the European Association of Cardiovascular Imaging. *Journal of the American Society of Echocardiography*. 2014 Sep;27(9):911–39.
- Carerj S, Trifiro MP, Granata A, et al. Comparison between transesophageal echocardiography and transthoracic echocardiography with harmonic tissue imaging for left atrial appendage assessment. *Clin Cardiol*. 2002 Jun 5;25(6):268–70.
- Hlaváčová K, Kaňovský J, Kask I, et al. Coronary physiology assessment: a routine method in a modern catheterization center. *Intervenční a akutní kardiologie*. 2022 Dec 19;21(4):229–39.

31. Kask I, Kaňovský J, Hlaváčková K, et al. Optical coherence tomography in a catheterization laboratory: at the verge of the second decade. *Intervenční a akutní kardiologie*. 2022 Mar 22;21(1):45-51.
32. Rivki M, Bachtiar AM, Informatika T, Teknik F, Indonesia UK. 3Mensio.com [Internet]. Available from: <https://www.3mensio.com/>.
33. Smitalová R, Pospíšil D, Farkasová B, et al. Simulation training in invasive and interventional cardiology. *Intervenční a akutní kardiologie*. 2020 Jun 2;19(2):130-3.
34. Kardiosim.cz [Internet]. Available from: <https://www.kardiosim.cz/>.
35. Volterrani M, Sposato B. Remote monitoring and telemedicine. *European Heart Journal Supplements*. 2019 Dec 1;21(Supplement_M):M54-6.
36. Zeitler EP, Piccini JP. Remote monitoring of cardiac implantable electronic devices (CIED). *Trends Cardiovasc Med*. 2016 Aug;26(6):568-77.
37. Bekfani T, Fudim M, Cleland JGF, et al. A current and future outlook on upcoming technologies in remote monitoring of patients with heart failure. *Eur J Heart Fail*. 2021 Jan 18;23(1):175-85.
38. Diment LE, Thompson MS, Bergmann JHM. Clinical efficacy and effectiveness of 3D printing: a systematic review. *BMJ Open*. 2017 Dec 21;7(12):e016891.
39. Batteux C, Haidar MA, Bonnet D. 3D-Printed Models for Surgical Planning in Complex Congenital Heart Diseases: A Systematic Review. *Front Pediatr*. 2019 Feb 11;7.
40. Wang C, Zhang L, Qin T, et al. 3D printing in adult cardiovascular surgery and interventions: a systematic review. *J Thorac Dis*. 2020 Jun;12(6):3227-37.
41. Kappanayil M, Koneti N, Kannan R, et al. Three-dimensional-printed cardiac prototypes aid surgical decision-making and preoperative planning in selected cases of complex congenital heart diseases: Early experience and proof of concept in a resource-limited environment. *Ann Pediatr Cardiol*. 2017;10(2):117.
42. Jung C, Wolff G, Wernly B, et al. Virtual and Augmented Reality in Cardiovascular Care. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2022 Mar;15(3):519-32.
43. Goo HW, Park SJ, Yoo SJ. Advanced medical use of three-dimensional imaging in congenital heart disease: Augmented reality, mixed reality, virtual reality, and three-dimensional printing. *Korean J Radiol*. 2020;21(2):133-45.
44. Proniewska K, Pregowska A, Walecki P, et al. Overview of the holographic-guided cardiovascular interventions and training – a perspective. *Bio-Algorithms and Med-Systems*. 2020 Sep 21;16(3).
45. Samant S, Bakhos JJ, Wu W, et al. Artificial Intelligence, Computational Simulations, and Extended Reality in Cardiovascular Interventions. *JACC Cardiovasc Interv*. 2023 Oct;16(20):2479-97.
46. Ouanes K, Farhah N. Effectiveness of Artificial Intelligence (AI) in Clinical Decision Support Systems and Care Delivery. *J Med Syst*. 2024 Aug 12;48(1):74.
47. Hnatkova K, Andršová I, Novotný T, et al. QRS micro-fragmentation as a mortality predictor. *Eur Heart J*. 2022 Oct 21;43(40):4177-91.
48. Kihlgren M, Almqvist C, Amankhani F, et al. The U-wave: A remaining enigma of the electrocardiogram. *J Electrocardiol*. 2023 Jul;79:13-20.
49. Surawicz B. U Wave: Facts, Hypotheses, Misconceptions, and Misnomers. *J Cardiovasc Electrophysiol*. 1998 Oct 20;9(10):1117-28.
50. Ritsemavaneck H, Kors J, Vanherpen G. The U wave in the electrocardiogram: A solution for a 100-year-old riddle. *Cardiovasc Res*. 2005 Aug 1;67(2):256-62.
51. Novotný T, Sisakova M, Kadlecova J, et al. Occurrence of notched T wave in healthy family members with the long QT interval syndrome. *Am J Cardiol*. 2004 Sep;94(6):808-11.
52. Fu Z, Zhang J, Luo R, et al. TF-Unet: An automatic cardiac MRI image segmentation method. *Mathematical Biosciences and Engineering*. 2022;19(5):5207-22.
53. Lei Y, Fu Y, Roper J, et al. Echocardiographic image multi-structure segmentation using Cardiac-SegNet. *Med Phys*. 2021 May;48(5):2426-37.
54. Rim B, Lee S, Lee A, et al. Semantic Cardiac Segmentation in Chest CT Images Using K-Means Clustering and the Mathematical Morphology Method. *Sensors*. 2021 Apr 10;21(8):2675.
55. Islam MdM, Poly TN, Li YC. Recent Advancement of Clinical Information Systems: Opportunities and Challenges. *Yerarb Med Inform*. 2018 Aug 29;27(01):083-90.
56. Torab-Miandoab A, Samad-Soltani T, Jodati A, et al. Interoperability of heterogeneous health information systems: a systematic literature review. *BMC Med Inform Decis Mak*. 2023 Jan 24;23(1):18.
57. Profesní katalog ČR. Platy zdravotníků 2025. 2024 [cited 2024 Oct 31]. Platy zdravotníků 2025. Available from: <https://www.kupnisila.cz/platy-zdravotniku-2025-tarifni-tabulky-priplatky/>.
58. Javadi M, Haleem A, Singh RP, et al. Sustaining the healthcare systems through the conceptual of biomedical engineering: A study with recent and future potentials. *Biomedical Technology*. 2023 Mar;1:39-47.
59. David Y, Judd T. Evidence-based impact by clinical engineers on global patients outcomes. *Health Technol (Berl)* [Internet]. 2020 Mar 2;10(2):517-35. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s12553-019-00345-0>.
60. Subramaniam S, Akay M, Anastasio MA, et al. Grand Challenges at the Interface of Engineering and Medicine. *IEEE Open J Eng Med Biol*. 2024;5:1-13.