

3D vizualizace a ergonomické hodnocení výrobní linky

Jan Kubr¹, Ilona Kačerová¹, Petr Hořejší¹, Konstantin Novikov¹

¹ Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, Katedra průmyslového inženýrství a managementu
Univerzitní 8, 306 14, Plzeň, Česká republika
kubrij@kp.v.zcu.cz
ikacerov@kp.v.zcu.cz
tucnak@kp.v.zcu.cz
novikov@kp.v.zcu.cz

Anotace: Pozitivní dopady využití virtuální reality v průmyslu byly již mnohokrát prokázány. Jak je to ale s reálným nasazením této moderní technologie v praxi? Tento článek se zabývá hodnocením ergonomických poloh na výrobní lince v prostředí automotive. Tato výrobní linka byla ve fázi návrhu a díky virtuální realitě bylo možné otestovat kompletní pracovní postup a v kombinaci s motion capture oblekem souběžně otestovat pracovní polohy dle české legislativy.

1 Úvod

V aktuální době digitální revoluce dochází ve světě výrobního průmyslu k novým konfiguracím konstrukčních nástrojů a metodik s odlišným přístupem. Mění se filozofie designu, která do inženýrského příspěvku integruje interpretační aspekty, výkonné postupy a kognitivní aspekty. Design se stává zaměřeným na člověka. Nové technologie virtuální reality umožňují ověřovat výkony navržených výrobků a výrobních procesů pomocí virtuálních prototypů ve virtuálním simulovaném prostředí. Tento přístup přináší společně řadu výhod z hlediska nákladů a času a umožňuje optimalizovat návrh montážní linky a souvisejících pracovišť tím, že zlepšuje i přínosy pro pracovníky.[4] Pomocí virtuální reality se bude moci operátor pohybovat a interagovat ve virtuálním prostředí pracoviště, aby bylo možné rychle a efektivně posoudit ergonomii budoucích řešení pracoviště a vyhnout se všem nákladným činnostem spojených s předvýrobním návrhem pracoviště nebo s prototypováním nových výrobků. [5]

2 Systém ergonomického hodnocení pracoviště

Systém ergonomického hodnocení pracoviště se skládá z následujících fází.

1. **Ergonomické hodnocení pracoviště** - Obecné principy ergonomického hodnocení pracovišť
2. **Ergonomické hodnocení pracoviště ve VR** - Možnost využití VR pro ergonomické hodnocení pracovišť

3. **Postup ergonomického hodnocení ve VR** - Nastavení postupu ergonomického hodnocení ve VR

V tomto kroku je cílem využít vytvořené interaktivní virtuální pracoviště. Dané pracoviště pak hodnotit z pohledu ergonomie. Obsahem kroku je tedy návrh systému ergonomického hodnocení ve VR za pomoci Motion Capture obleku. Tato kombinace pokročilých technologií umožní efektivní návrh a ergonomickou optimalizaci nově vznikajících pracovišť.

2.1 **Ergonomické hodnocení pracoviště**

Aby bylo možné navrhnout nové pracoviště dle ergonomických principů, nebo bylo možno posoudit již existující pracoviště, zda tyto principy splňuje, je vždy nutné se držet daných existujících legislativních předpisů v dané zemi. Tyto legislativní rozdíly musí respektovat i existující SW řešení pro ergonomické návrhy a ověřování pracovišť. V ČR je tímto hlavním platným předpisem Nařízení vlády č. 361/2007 Sb., které uvádí způsob hodnocení jednotlivých rizikových faktorů, na základě kterých, se kategorizace prací provádí a stanovují se jím podmínky ochrany zdraví při práci. [1]

V rámci ČR a platných legislativních předpisů má každý zaměstnavatel provádět tzv. *Kategorizaci prací*, která říká, jak rizikové je dané pracoviště a jaká pravidla jsou tedy v rámci nich uplatňována. Prostřednictvím platných legislativních předpisů je vytvářen rámec požadavků, které je nutné plnit při kategorizaci prací prováděných na pracovištích.

Nejvíce problematickým rizikovým faktorem dle NV 361/2007 při hodnocení ochrany zdraví při práci je fyzická zátěž, na kterou mají vliv další faktory, jako jsou:

- Celková fyzická zátěž
- Pracovní poloha
- Ruční manipulace s břemeny
- Lokální svalová zátěž [2]

Pokud budeme posuzovat již existující pracoviště, nebo navrhovat nové, tak se legislativní rámec nemění. Rozdílný je přístup k tomu, jakým způsobem budou posuzována hodnocená kritéria:

- u nově navrhovaného pracoviště – proaktivně tak, aby byla všechna kritéria naplněna tak, aby rizikový faktor působil svým vlivem minimálně.
- u existujícího pracoviště – reaktivně – zjišťuje se skutečný stav působení rizikového faktoru a následně probíhá snaha o minimalizaci jeho působení tak, aby práce, resp. pracoviště spadalo do co nejnižší rizikové kategorie. [3]

Tabulka 1 - Analýza pracoviště, konkrétní data

| Analýza | Výstupy | Splněno? |
|-------------------|-------------------------------------|----------|
| Procesní | Pracovní postup | ✓ |
| | Základní pohyby | ✓ |
| | Stroje – žádné | ✓ |
| | Využití díly, celý komponent | ✓ |
| Časová | Časy jednotlivých pohybů | ✓ |
| | Časy jednotlivých úkolů | ✓ |
| | Seznam pracovních pohybů | ✓ |
| | Pořadí dílů | ✓ |
| Datová | Model pracoviště a haly | ✓ |
| | Model sestavy a jednotlivých dílů | ✓ |
| | Materiály jednotlivých komponent | ✓ |
| Prostorová | Rozměry pracoviště a jeho komponent | ✓ |
| | Layout haly, pracoviště | ✓ |
| | Tok materiálu | ✓ |
| | Rozmístění nástrojů | ✓ |

Z toho vyplývá, že určité rizikové faktory působící při práci jsou v rámci této analýzy známé, řešené. Tím pádem je možné data využít při kategorizaci prací, resp. hodnocení pracoviště.

- **Pokud pracoviště existuje**, je možné některá data získat přímo na pracovišti. V takovém případě jde o reaktivní přístup, kdy je nutné mnoho odborníků na jednotlivé oblasti a dle toho se odvíjí nároky jak na čas, tak na odborníky, vybavení a měření. Náprava zjištěných skutečností je pak většinou mnohem nákladnější než proaktivní přístup.
- **Pokud pracoviště neexistuje** je nutné vytvořit model pracoviště v sofistikovaných softwarech, věnovaných ergonomickým analýzám.

Tyto SW nebo jejich balíčky většinou bývají součástí větších SW nástrojů, které jsou velmi finančně nákladné jak ze svojí podstaty, tak z hlediska nákladů na pracovníky, kteří s nimi pracují. Velmi často se také jedná o nástroje světové, ve kterých není implementována česká legislativa a rámec požadavků, které je nutné plnit při kategorizaci prací prováděných na pracovištích.

Pokud pracoviště ještě neexistuje je možné jej nejen navrhnout s respektováním ergonomických principů, ale i jej odladit dle požadavku zákazníka. K tomu může sloužit virtuální realita. Její hlavním rysem je tzv. imerzivita, tedy schopnost vtáhnout člověka do vytvářeného prostředí. Tím pádem se dostane z prostředí běžného do virtuálního. Aby bylo toto možné, je nutné mít toto prostředí vytvořené. [1]

Poté je nutné, aby bylo možné do tohoto prostředí přenést jednoduše to, co je u běžných ergo SW složitě modelováno odborníky, a tedy i finančně náročné. A tím není jen prostředí a předměty v něm, ale zejména reálný pohyb, v reálném čase a jeho analýza, taktéž v reálném čase. Reálný pohyb v čase znamená zaujímání pracovních poloh částí těla pracovníka. To přímo souvisí s fyzickou zátěží, kterou je možné dle poloh těla při práci hodnotit.

K přenosu reálného pohybu člověka do VR prostředí může sloužit tzv. Motion Capture oblek. To vše se ale s vývojem možností techniky a úrovně vědeckého poznání mění.

2.2 Ergonomické hodnocení pracoviště ve VR

Výhodou ergonomického hodnocení pracovišť je možnost ověřování dosud v reálném prostředí neexistujícího pracoviště. To umožňuje:

- ověření plnění ergonomických principů,
- plnění ergonomických rizikových faktorů,
- ještě předtím, než je provedena investice,
 - jak do prostoru samotného pracoviště,
 - tak především do jeho vybavení.

Pokud je provedeno prvotní ověření, je možné dle zvolených legislativních rámců příslušné země provádět odladění pracoviště s různými vstupními parametry, dle přání investora.

Uvedené úkony se dají provádět obecně s postavou s antropometrickými rozměry dle percentilu dané populace, nebo se zcela konkrétní postavou pracovníka, který bude práci na pracovišti v budoucnu vykonávat.

Aby toto bylo možné, je nejprve nutné:

- vytvořit virtuální svět,
- do kterého je nutno umístit postavu pracovníka – tvorba nebo užití existujícího modelu,
- staticky nastavovat scénu,
- nebo přenášet reálný pohyb

- mít vytvořený ergonomický analytický nástroj spolupracující s VR prostředím.

Hodnocení plnění ergonomických parametrů a rizikových faktorů může probíhat staticky, avšak celkově je nutné “nastavit” postavu pracovníka do všech poloh, do kterých se tělo pracovníka při vykonávání pracovních úkolů dostane. To ovšem celý proces velmi zdržuje a prodražuje.

V takové případě je vhodné použít existující ergonomické analytické SW nástroje, které jsou však velmi finančně náročné a zpracování pracoviště i analýzy v nich je mnohonásobně dražší.

Jako vhodnější je tedy použít přenos reálného pohybu pomocí vhodného tzv. Motion capture obleku (dále MoCap).

3 Postup ergonomického hodnocení ve VR

Aby bylo možné propojit MoCap oblek s VR prostředím, je nejprve nutné jej vytvořit v některém z vhodných tzv. enginů v tomto případě Unity3D. [6]

Následně bylo nutné provést ergonomické hodnocení pracoviště ve VR. Aby toto bylo možné, musí existovat ergonomická funkcionální pro dané hodnocení, protože samotný MoCap oblek pouze přenáší pohyb do digitálního (virtuálního) prostředí.

Možnosti, jak ergonomické hodnocení ve VR provést jsou ve své základní podobě dvě:

- propojit MoCap oblek s nástrojem, který obsahuje digitální prostředí i ergonomickou analýzu, resp. funkcionální pro hodnocení pracoviště
- propojit MoCap oblek s vytvořeným digitálním prostředím a vytvořenou funkcionální, umožňující ergonomické hodnocení ve VR.

3.1 Propojení MoCap obleku s nástrojem, který obsahuje digitální prostředí i ergonomické analýzy

Tento postup byl zvolen z toho důvodu, aby byla ověřena schopnost propojení MoCap obleku s různými existujícími nástroji a prostředím, stejně jako prověřena přesnost přenášeného pohybu



Obrázek 1 - Siemens Process Simulate Human

Funkcionalita propojení i přesnost celého systému MoCap obleku a Tecnomatix Siemens proces Simulate Human, stejně jako vstupy zaznamenaného pohybu do ergonomických analýz bylo potvrzeno a byla tím potvrzena vhodnost pořízeného MoCap systému.

3.2 Propojení MoCap obleku s vytvořeným digitálním prostředím (VR) a vytvořenou funkcionalitou, umožňující ergonomické analýzy

K napojení MoCap systému na VR prostředí bylo testováno prostředí vytvořené prostřednictvím Unity 3D enginu.

Aby bylo možné využít možnosti MoCap systému pro přenos **reálného pohybu v čase**, tedy **zaujímání pracovních poloh částí těla pracovníka**, což přímo souvisí s **fyzickou zátěží**, kterou je možné dle poloh těla při práci hodnotit, bylo nutné vytvořit funkcionalitu, která by toto ve VR prostředí umožňovala a výsledky poskytovala ve vhodné formě a běžně dostupném SW.

Na základě toho došlo přes speciálně vytvořenou aplikaci (v Unity 3D) k napojení na platformu Axis Studio (součást Perception Neuron Studia), odkud byly získávány údaje, které do systému posílal MoCap oblek, ve kterém byl oblečený snímaný proband.

Informace získávané z ergonomického hodnocení pracoviště prostřednictvím VR jsou výsledkem:

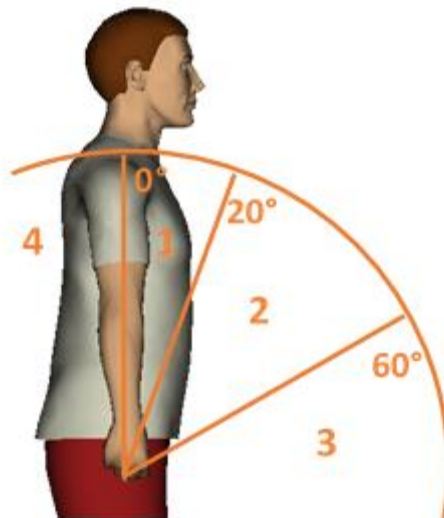
- vytvořeného modelu pracoviště ve VR,
- ve zvoleném VR enginu,
- spojení pohybu probanda,
- přes MoCap oblek,

- do vytvořeného modelu,
- kde proband prováděl pohyby jako při reálné pracovní činnosti,
- čímž se jeho tělo díky VR modelu dostávalo do reálných pracovních poloh,
- jejichž parametry byly měřeny.

Pomocí propojení technologie VR a MoCap získávané parametry o polohách těla při práci ve VR modelu. To vše ve vazbě na jednotlivé snímky v čase, které je VR engine schopen generovat.

Tabulka 2 - Ukázka specifikace poloh trupu při práci

| část těla | označení | poloha | přijatelná | podmíněně přijatelná | nepřijatelná |
|-----------|----------|-----------------|--------------|----------------------|---------------------------------|
| trup | A | předklon/záklon | 0° - 40° (1) | 40° - 60° (2) | 60° a více (3) 0° a méně (4) |
| | B | úklon | 0° - 20° (1) | 20° a více (2) | 20° a více (2) |
| | C | otáčení | 0° - 20° (1) | 20° a více (2) | 20° a více (2) |



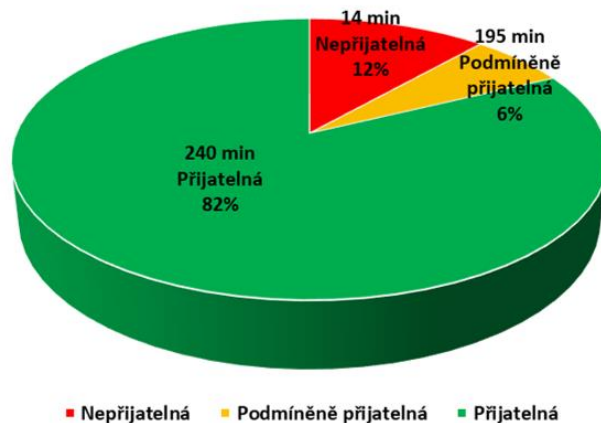
Obrázek 2 - Polohy trupu při práci

Pro získávání výše uvedených informací bylo užito excelu, aby bylo možné data i následně srozumitelně interpretovat prostřednictvím obvykle dostupného SW a dle potřeby NV 361/2007, tedy aby bylo možné zjistit:

- která část těla
- se dostala do jaké polohy
- a jakou dobu v ní setrvala
- a jak je tato poloha hodnocena.

V grafickém vyjádření byl pak zvolen mimo tabulek výstup i ve formě grafické s pomocným obrázkem, aby si uživatel mohl celou situaci lépe představit

Poloha trupu:



Obrázek 3 - Grafické vyjádření ergonomické analýzy ve VR za užití MoCap dle NV 361/2007

4 Ergonomické testování ve VR

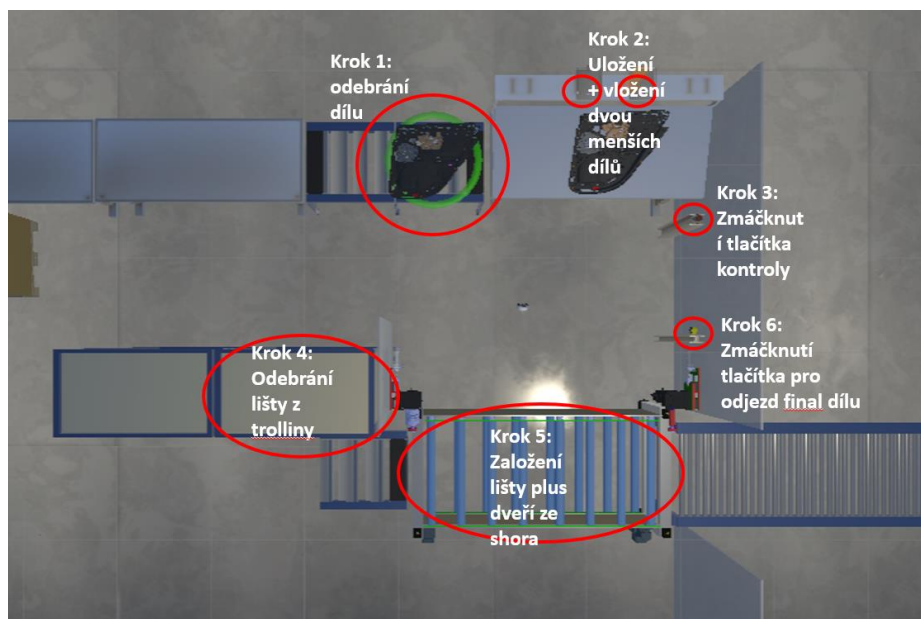
Následující podkapitoly se detailně věnují ergonomickému testování ve virtuální realitě.

4.1 Údaje o pracovištích, pracovní popis (časové faktory práce, režim práce), sledované osoby

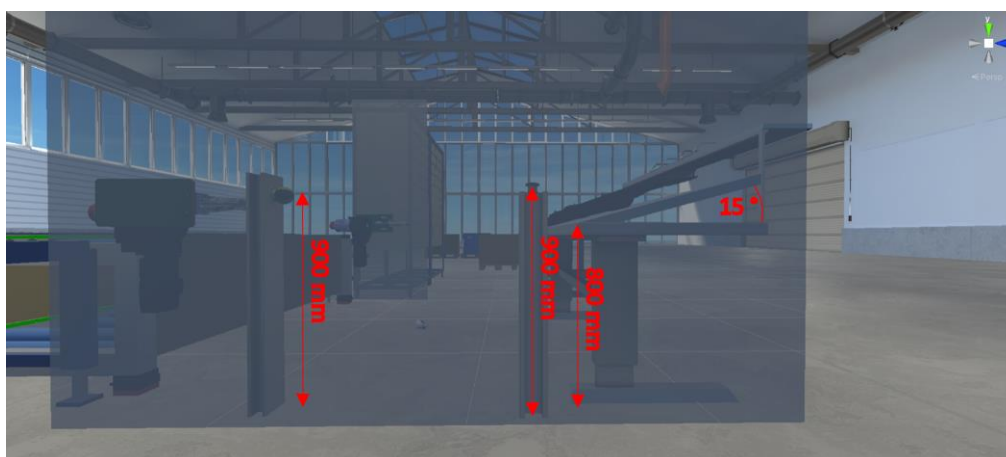
Proměřena a hodnocena byla práce mužů a žen na lince FlexLine, která bude vykonávána v osmihodinových směnách. Pracovníci mají k dispozici přestávku na oběd 30 minut. Směna je celkem 480 minut, čistého času práce je 450 minut.

Norma cca 620 ks/směnu.

Obrázek reálného pracoviště ve virtuální realitě viz níže.



Obrázek 4 - 3D vizualizace pracoviště



Obrázek 5 - 3D vizualizace pracoviště - rozměry

Měření bylo provedeno na 10 zapracovaných operátorech podniku.

- 5 žen, průměrná výška 165 cm, průměrná váha 64 kg
- 5 mužů, průměrná výška 178 cm, průměrná váha 83 kg

4.2 Průměrné výsledky všech měření

Při provádění práce dochází k opakovanému zaujímání těchto nepříjemných a podmíněně přijatelných pracovních poloh:

- Vzpažení paže 40° - 60° – při frekvenci pohybů menší 2/minutu – podmíněně přijatelná pracovní poloha dynamická. Celková doba práce v této poloze byla kalkulována pro pravou horní končetinu na cca 11 minut a pro levou horní končetinu na cca 8 minut v průměrné 8hod. pracovní směně.
- Vzpažení paže nad 60° – při frekvenci pohybů větší nebo rovné 2/minutu – nepříjemná pracovní poloha dynamická. Celková doba

práce v této poloze byla kalkulována pro pravou horní končetinu na cca 34 minut a pro levou horní končetinu na cca 5 minut v průměrné 8hod. pracovní směně.

- Předklon 40° - 60° – podmíněně přijatelná pracovní poloha dynamická. Celková doba práce v této poloze byla kalkulována na cca 7 minuty v průměrné 8hod. pracovní směně.
- Předklon nad 60° – při frekvenci pohybů větší nebo rovné 2/minutu – nepřijatelná pracovní poloha dynamická. Celková doba práce v této poloze byla kalkulována na cca 12 minut v průměrné 8hod. pracovní směně.
- Předklon hlavy větší než 25° – nepřijatelná pracovní poloha při frekvenci větší nebo rovné 2/min. Celková doba práce v této poloze byla kalkulována na cca 18 minut v průměrné 8hod. pracovní směně.
- Rotace hlavy do 15°s frekvencí menší než 2/min – podmíněně přijatelná pracovní poloha. Celková doba práce v této poloze byla kalkulována na cca 30 minut v průměrné 8hod. pracovní směně.

4.3 Racionalizační úprava pracoviště

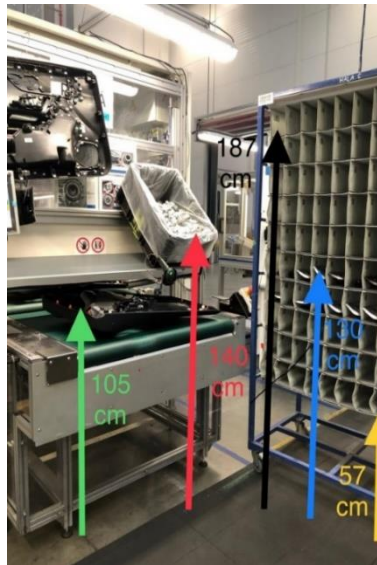
Vzhledem k výsledkům měření pomocí kinematického obleku byla doporučena racionalizační úprava pracoviště. Hlavním problémem bylo umístění KLT boxů s materiálem mimo komfortní dosahovou zónu operátora. V případě nižší a průměrné výšky je umístění KLT boxů velmi hluboko a vysoko. V případě nižší a průměrné výšky pracovníka je rameno v nepřijatelné pracovní poloze déle než 30 minut (limit z hlediska NV 361/2007 Sb.) a pracoviště by bylo z hlediska ergonomie pracovního místa zařazeno do 3. pracovní kategorie.

KLT boxy je doporučeno umístit níže – například pod pracovní stůl, viz obrázek níže.



Obrázek 6 - Nové umístění KLT boxů

Dále je vhodná úprava trollin – míst, odkud operátoři berou materiál. Cca 1/3 dílů je umístěna příliš vysoko. Viz obrázek níže.



Obrázek 7 - Nové umístění KLT boxů

5 Závěr

Cílem projektu bylo ověření pracoviště z ergonomického hlediska a ověření celkového pracovního postupu. Pro toto ověření byly využity moderní technologie jako je MotionCapture oblek a virtuální realita. Zmiňovaný oblek sloužil k snímání pohybu pracovníka. Pracovník vykonával pohyby 1:1 v porovnání s budoucím reálným procesem. Díky virtuální realitě mu bylo umožněno vidět a využívat pracovní linku, která se nacházela stále ve fázi návrhu. Díky měřením, které byly provedeny na virtuálním pracovišti, byly provedeny racionalizační kroky. V případě provedení racionalizačních úprav na posuzované pracoviště byla pracovní poloha pravé horní končetiny v limitu dle NV 361/2007 Sb. Celosměnovou prací by poté bylo možné zařadit z hlediska faktoru pracovní polohy do kategorie práce 2. V této fázi se nejedná o autorizované měření, pouze o prvotní screening ergonomičnosti pracoviště.

Poděkování

Tento článek byl vytvořen za podpory interního grantu ZCU, SGS-2021-028 s názvem Vývojové a tréninkové prostředky pro interakci člověka a kyberfyzického výrobního systému, Developmental and training tools for the interaction of man and the cyber-physical production systém.

Použitá literatura

- [1] BUREŠ, M. Tvorba a optimalizace pracoviště. 1. vyd. Plzeň: SmartMotion s.r.o., 2013, ISBN: 978-80-87539-32-3
- [2] Nařízení vlády č. 361/2007 Sb. In: zakonyprolidi.cz [online]. [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2007-361>
- [3] MAREK, Jakub, SKŘEHOT, Petr. *Základy aplikované ergonomie*. Praha: VÚBP, v.v.i., 2009, 118 s., ISBN 978-80-86973-58-6.
- [4] Caputo, F. & Greco, Alessandro & D'Amato, Egidio & Notaro, Immacolata & Spada, S.. (2018). On the use of Virtual Reality for a human-centered workplace design. *Procedia Structural Integrity*. 8. 297-308. 10.1016/j.prostr.2017.12.031.
- [5] Battini, Daria & Calzavara, Martina & Persona, Alessandro & Fabio, Sgarbossa & Visentin, Valentina & Zennaro, Ilenia. (2018). Integrating mocap system and immersive reality for efficient human-centred workstation design. *IFAC-PapersOnLine*. 51. 188-193. 10.1016/j.ifacol.2018.08.256.
- [6] KUBR, Jan., N., NOVIKOV, Konstantin, HOREJSI, Petr., KLEINOVA, Jana., & KRAKORA, David. (2021). Connecting a virtual production and a plc. *MM Science Journal*, 2021(2), 4452–4462. https://doi.org/10.17973/mmsj.2021_6_2021007