



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

## ICPE-S 2018

37<sup>th</sup> International Conference on Production  
Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## SOFTVERSKA PODRŠKA UREĐAJU ZA ISPITIVANJE GUBITAKA USLED TRENJA U NAVOJNIM SPOJEVIMA

Jasmina MILJOJKOVIĆ<sup>1\*</sup>, Milan ERIĆ<sup>1</sup>, Aleksandar KOŠARAC<sup>2</sup>, Vladimir KOČOVIĆ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, Srbija, [jasmina.miljojkovic@fink.rs](mailto:jasmina.miljojkovic@fink.rs);  
[ericm@kg.ac.rs](mailto:ericm@kg.ac.rs); [vladimir.kocovic@kg.ac.rs](mailto:vladimir.kocovic@kg.ac.rs)

<sup>2</sup>Mašinski fakultet Univerziteta u Istočnom Sarajevu, Republika Srpska, BiH,  
[aleksandar.kosarac@ues.rs.ba](mailto:aleksandar.kosarac@ues.rs.ba)

**Apstrakt:** U radu je opisan razvoj softverske podrške uređaju za ispitivanje gubitaka usled trenja u navojnim spojevima. Razvoju softverske podrške prethodila su razmatranja mogućih načina unapređenja unosa podataka i proračuna baziranih na rezultatima merenja, poznatim teorijskim zavisnostima i postavkama uređaja. Softver, koji je razvijen u Visual Basic for Applications (VBA) razvojnom okruženju, obezbedio je efikasan unos i obradu podataka.

**Ključne reči:** Trenje, navoj, zavrtnajska veza, softver, VBA

### 1. UVOD

Talas promena u svetskoj industriji doneo je nove modele poslovanja i nove tehnologije, ali mnogi proizvodi, ma kako bili „konzervativni“, još uvek nemaju adekvatnu zamenu. „Navojni spoj XXI veka još uvek ne postoji“ [1], jer i u eri digitalne transformacije, automatizacije i inovacija, koje prevazilaze očekivanja s kraja prethodnog veka, u toj oblasti još uvek nije rečena poslednja reč, ni u nauci, kao ni u domenu proizvodnih tehnologija i primene.

Obrtni moment, kojim se vrši pritezanje zavrtnja, u najvećoj meri, i to 85-90% [1, 2], se troši na savlađivanje trenja. Proučavanje granica u kojima bi trebalo da se kreću vrednosti koeficijenta trenja u navojnom spoju posebno je značajno ako se ima u vidu masovna primena zavrtnajskih veza i činjenica da je u pitanju tržište koje beleži neprekidni rast, što potvrđuju i podaci globalnih istraživačkih i konsultantskih kuća [3, 4, 5].

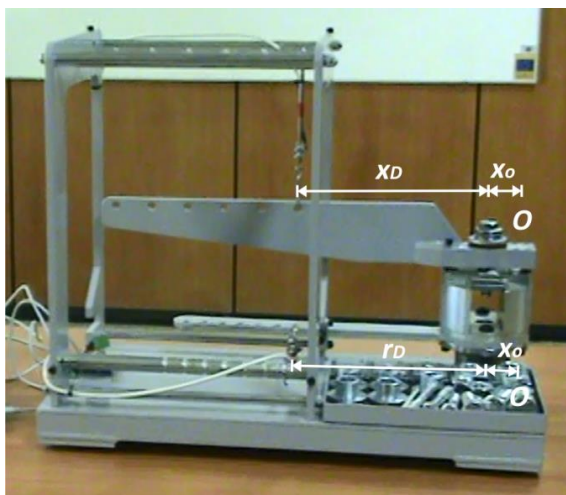
U literaturi se mogu naći primeri razvoja uređaja uz pomoć kojih se trenje u navoju najčešće ispituje nezavisno od trenja između glave zavrtnja i ploče, a primena aksijalnog kugličnog ležaja predstavlja jedan od načina da se određena komponenta trenja isključi iz proračuna [2]. Jedno od predloženih rešenja bazira se na kontrolisanju aksijalne sile uz pomoć računara i simuliranju procesa pritezanja zavrtnajske veze, pri čemu su glava zavrtnja i navrtka pričvršćene kako bi se sprečilo okretanje [6]. Primenjivana su i rešenja sa dvostrukom funkcijom: određivanje koeficijenta i radijusa trenja na glavi zavrtnja i, uz promenu postavke uređaja, za određivanje koeficijenta trenja u navoju [7]. Razvijeni su i uređaji za potrebe utvrđivanja razlika između mehaničkih i triboloških karakteristika metričkog navoja izrađenog hladnim valjanjem i mašinski obrađenog navoja [8], proučavanje promena vrednosti koeficijenta trenja tokom višestrukog pritezanja, kao i rešenja za

posredno proučavanje uticaja trenja, primenom Hukovog zakona i drugih teorijskih zavisnosti, a na osnovu sabijanja čelične čaure, postavljene između navrtke i ploče [9].

U navedenim, kao i brojnim drugim primerima laboratorijskih ispitivanja, odgovarajuća softverska podrška igra veoma važnu ulogu u procesu akvizicije i obrade podataka. U radu je opisan princip rada uređaja, razvijenog za potrebe ispitivanja gubitaka usled trenja u navojnom spoju, kao i razvoj odgovarajuće softverske podrške.

## 2. OSNOVNE KARAKTERISTIKE UREĐAJA I MATEMATIČKI MODEL PRORAČUNA

Princip rada uređaja bazira se na merenju sile pritezanja i primenjenog obrtnog momenta postavljanjem senzora na dve poluge (slika 1).



Slika 1. Fotografija uređaja

Senzor, koji se nalazi na vertikali gornje poluge, registruje aksijalnu silu, dok drugi senzor, koji je položen horizontalno, registruje silu nastalu usled primene obrtnog momenta pri pritezanju. Osa zavrtnja i nosač poluge imaju fiksni položaj u odnosu na obrtnu tačku. Poluge mogu biti oslonjene u više različitih položaja, kao što se i položaj senzora može menjati, odabirom odgovarajućeg otvora na polugi. Ispitivanje se može sprovesti sa navojnim parom metričkog, trapeznog, kosog i drugih vrsta navoja.

Kako bi se trenje u navoju ispitivalo nezavisno od trenja koje nastaje na dodirnoj površini glave zavrtnja i ploče, ispod glave

zavrtnja postavljen je aksijalni kuglični ležaj, koji pri normalnim opterećenjima i brzinama obezbeđuje malu vrednost koeficijent trenja, koja se u proračunu može zanemariti [2, 10].

Na osnovu izvršenih merenja može se uspostaviti veza između momenta i sile u zavrtnju, a daljim proračunom se dolazi do vrednosti koeficijenta trenja u navojnom spoju. U nastavku je prikazan tok proračuna, baziranog na postavkama projektovanog uređaja (slika 1).

Ako usvojimo sledeće oznake:

$x_o$  – rastojanje oslonca poluge sile od ose zavrtnja,

$x_d$  – rastojanje vertikalnog dinamometra od ose zavrtnja,

$F_d$  – sila koju meri vertikalni dinamoimetar,

$F_z$  – aksijalna sila u zavrtnju,

iz uslova da je u tački oslonca:

$$\sum M_o = 0, \quad (1)$$

sledi:

$$F_d(x_o + x_d) - F_z \cdot x_o = 0, \quad (2)$$

i dobija se izraz za proračun sile pritezanja u zavrtnju:

$$F_z = F_d \frac{x_o + x_d}{x_o}. \quad (3)$$

Ako usvojimo sledeće oznake:

$x_o$  – rastojanje oslonca poluge momenta od ose zavrtnja,

$x_d$  – rastojanje horizontalnog dinamometra od ose zavrtnja,

$F_m$  – sila koju meri horizontalni dinamoimetar,

$M_z$  – obrtni moment zavrtnja,

dobija se izraz za proračun obrtnog momenta zavrtnja:

$$M_z = F_m(x_o + r_d). \quad (4)$$

Kako bi se dobio izraz za proračun koeficijenta trenja, polazi se od poznatih izraza kojima se definiše zavisnost sile pritezanja i momenta otpora u navojnom paru, pri čemu se trenje na dodiru glave zavrtnja i podloge u ovom slučaju zanemaruje:

$$F_z = \frac{M_z}{\frac{d_m}{2} \operatorname{tg}(\alpha + \rho)}, \quad (5)$$

$$\rho = \arctg \left[ \frac{2M_z}{d_m F_z} \right] - \alpha, \quad (6)$$

$$\mu = \operatorname{tg} \rho, \quad (7)$$

gde je:

$d_m$  – srednji prečnik zavojnice,

$\alpha$  – ugao nagiba zavojnice,

$\rho$  – ugao trenja,

$\mu$  – koeficijent trenja u navoju.

### 3. RAZVOJ SOFTVERSKJE PODRŠKE

Sistem za akviziciju podataka sastoji se od dva senzora i *Arduino* fizičko-računarske platforme, dok softver *Telemetry Viewer* tokom ispitivanja daje prikaz sile i momenta na ekranu i pohranjuje rezultate merenja u CSV formatu. Za izradu pratećeg softvera, čija je funkcija preuzimanje i obrada dobijenih podataka, odnosno obavljanje proračuna i kreiranje odgovarajućih dijagrama, korišćen je programski jezik *Visual Basic for Applications (VBA)*, koji je “makro” jezik. U računarstvu se pod pojmom makro (engl. *macro* ili *macroinstruction*) podrazumeva niz komandi povezanih u jednu komandu kako bi zadatak bio automatski izvršen. Praksa je pokazala da je *VBA* pogodan za primenu kada je važno pojednostaviti unos podataka, obaviti proračune ili statističke analize podataka, ili obraditi podatke, koji mogu biti izlaz drugog softvera [11, 12]. Pri razvoju softverske podrške uređaju za merenje gubitaka u navojnom spoju korišćena je još jedna pogodnost koju pruža *Visual Basic for Applications*, a to je mogućnost kreiranja elektronskog korisničkog formulara (*User Form*), koji je pogodan za unos podataka.

Izradi pratećeg softvera pristupljeno je po sledećoj metodologiji [13]:

- **Definisanje problema**

Kako bi se obavio proračun na osnovu ranije prikazanog matematičkog modela, neophodan je unos podataka u matricu (najčešće u *MS Excel-u*) o izmerenim silama, geometrijskim karakteristikama odabranog zavrtnja, odabranoj poziciji oslonaca obe poluge u odnosu na osu zavrtnja i odabranim pozicijama dinamometara, a zatim obaviti proračun i

izraditi odgovarajuće dijagrame. Takođe, problem je i brisanje vrednosti sila koje je sistem za akviziciju zabeležio pre i posle samog pritezanja zavrtnja, a koje su bliske nuli i nisu relevantne za proračun, kao ni za izradu dijagrama.

- **Izrada algoritma**

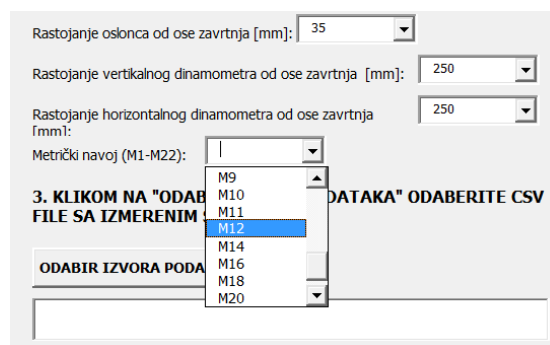
Svemu navedenom u algoritmu (slika 3) prethodile su pripremne radnje – kreiranje i dizajniranje korisničkog okruženja i pisanje kodova u *VBA Editor-u*, koji aktiviraju funkcije za svako dugme koje se nalazi u korisničkom formularu, pisanje kodova koji upućuju korisniku obaveštenje da omogući korišćenje makroa, kako bi mogao da pokrene program, kao i kodova za isključivanje makroa po izlasku iz programa, itd.

- **Pisanje i unošenje programa u računar**
- **Testiranje programa i ispravke grešaka**
- **Implementacija programa i obuka korisnika**
- **Održavanje i dogradnja programa.**

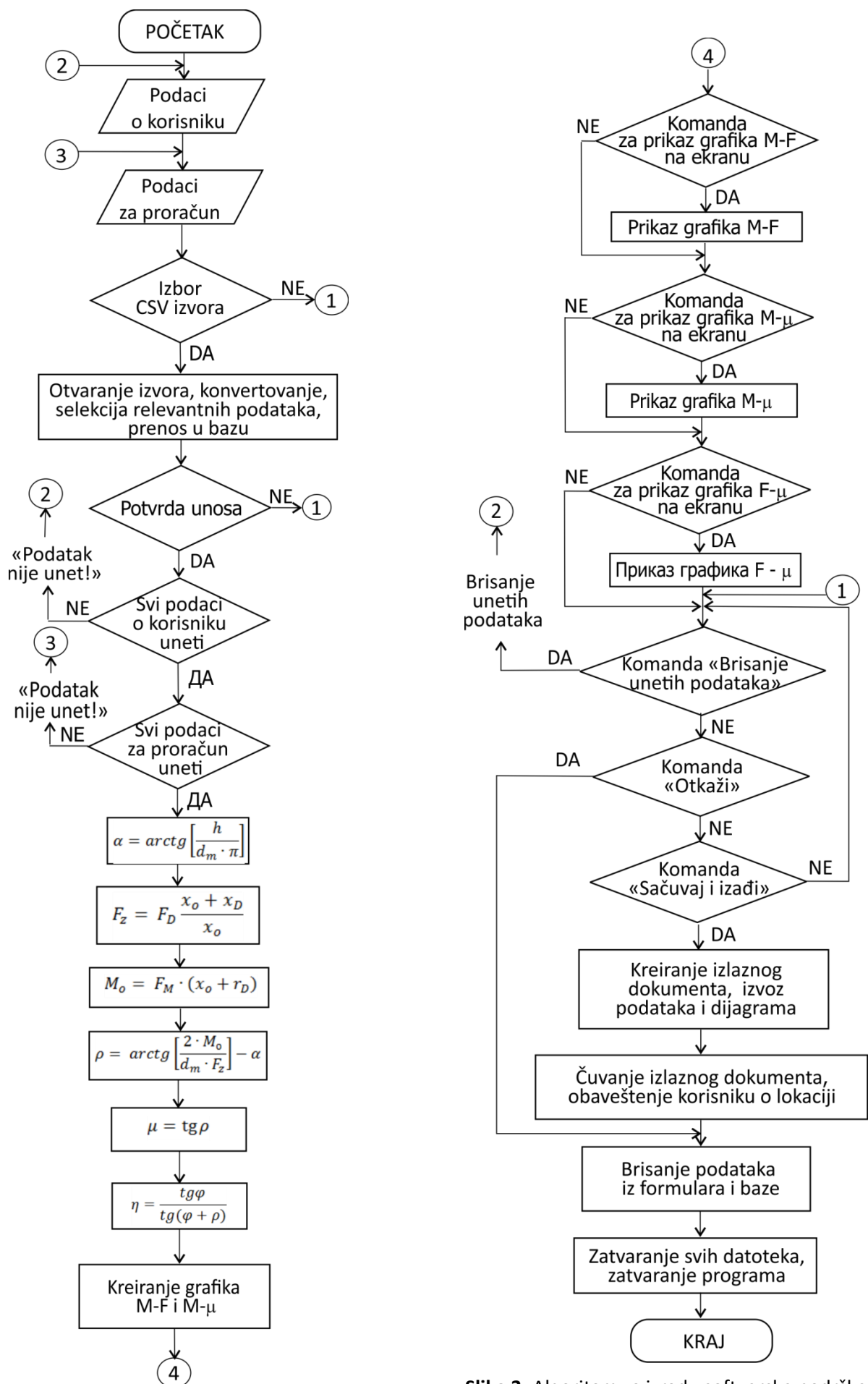
Izlazna datoteka, u kojoj će biti sačuvani uneti podaci o korisniku i datum ispitivanja, polazni podaci u vezi sa postavkama uređaja i geometrijom odabranog zavrtnja, vrednosti izmerenih sila, rezultati proračuna i dijagrami, može biti u različitim *MS Office* ili drugim formatima.

### 4. REZULTATI

Softver je testiran i primenjen pri ispitivanju čeličnih zavrtnja sa standardnim metričkim navojem M10 i M12, M14 i M18, klase čvrstoće 8.8. Na slici 2 prikazan je detalj korisničkog okruženja, u kojem je unos podataka olakšan odabirom opcija iz padajućih menija.

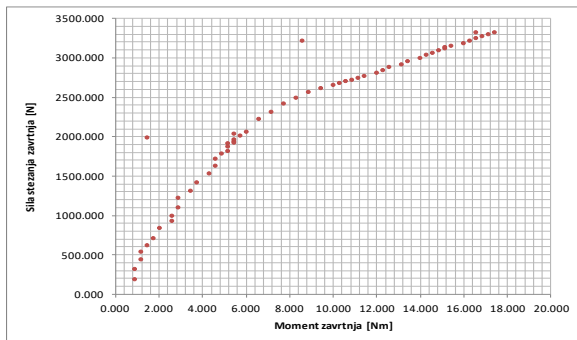


Slika 2. Detalj korisničkog okruženja

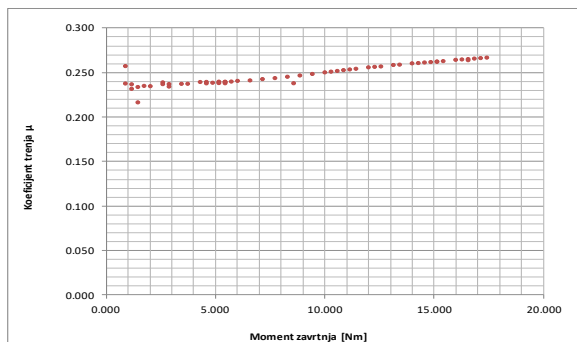


Slika 3. Algoritam za izradu softverske podrške

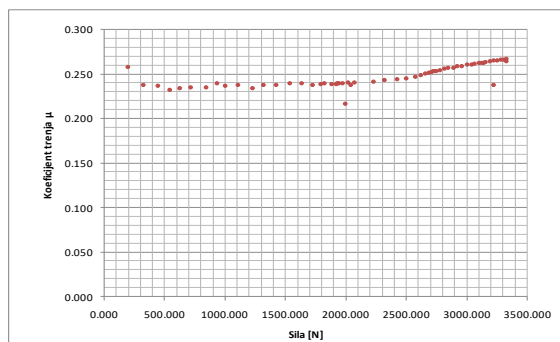
Pri pokretanju softvera, korisnik na ekranu vidi samo korisničko okruženje, dok ostali procesi nisu vidljivi. Po izboru, korisnik može videti prikaz dijagrama na ekranu odmah po unosu podataka. Na slici 4 prikazani su dijagrami dobijeni kao rezultat proračuna pri jednom od ispitivanju zavrtnja M12.



a) Dijagram moment-sila



b) Dijagram moment-koeficijent trenja



c) Dijagram sila-koeficijent trenja

Slika 4. Dijagrami dobijeni kao rezultat ispitivanja zavrtnja M12

## 5. ZAKLJUČAK

U radu je opisan proces razvoja i primene softverske podrške uređaju za ispitivanje gubitaka usled trenja u navojnim spojevima. Razvoju softverske podrške prethodila su razmatranja mogućih načina unapređenja

unosa rezultata merenja u matricu za proračun, kao i samog proračuna, baziranog na izmerenim veličinama.

Softver je efikasno obavio proračun na osnovu matematičkog modela, baziranog na postavkama uređaja i poznatim teorijskim zavisnostima u oblasti navojnih spojeva. Unos podataka je znatno pojednostavljen i ubrzan, a obrada rezultata merenja obavljena je efikasno, bez opterećivanja ekrana, odnosno korisnika, pratećim procesima, poput otvaranja datoteka, prenosa podataka i sl. Pri tome, obrada rezultata merenja je zaštićena od grešaka, koje bi se mogle dogoditi pri manuelnom unosu i daljoj obradi podataka.

Prednost prikazanog rešenja za izradu softverske podrške uređaju za ispitivanje gubitaka usled trenja u navoju je u dostupnosti VBA razvojnog okruženja u okviru široko primenjivanih programskih sistema, kao što je MS Office. Prateći mogućnosti daljih ispitivanja, koja bi se mogla sprovesti na prikazanom uređaju, ali i drugim uređajima srodne namene, softver bi se mogao dalje dograđivati. Takođe, postoji mogućnost kustomizacije radnog okruženja, u zavisnosti od potreba korisnika.

## LITERATURA

- [1] W. A. Grabon, M. Osetek, T.G. Mathia, Friction of threaded fasteners, *Tribology International*, Vol. 118, pp. 408–420, 2018.
- [2] M. Klöcker, S. Westphal, Investigations of friction-relevant parameters to ensure reliable bolted joints, in: *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, Vol. 94, p. 04007, 2017.
- [3] Freedonia Group, Global Industrial Fastener Market - Demand and Sales Forecasts, available at: <https://www.freedoniagroup.com/Global-Industrial-Fastener-Market.html>, accessed: 11.06.2018.
- [4] Grand View Research, Industrial fasteners market analysis 2018 – 2025, available at: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/industrial-fasteners-market>, accessed: 11.06.2018.
- [5] S. S. Hamedani, European market and global fastener demand, *China Fastener World*, no. 47, pp. 118-119, 2016.

- [6] Y. Jiang, M. Zhang, T. W. Park, C. H. Lee, An Experimental Investigation on Frictional Properties of Bolted Joints, *Proceedings of the 2002 ASME Pressure Vessel and Piping Conference, 2002, Vancouver*, Vol. 433, pp. 59–66.
- [7] S. A. Nassar, H. El-Khiamy, G. C. Barber, Q. Zou, T. S. Sun, An Experimental Study of Bearing and Thread Friction in Fasteners, *Journal of Tribology*, Vol. 127, pp. 263–272, 2005.
- [8] A. Ibrahmi, M. Hbaieb, A. Krichen, Experimental study of the effect of the threading process on the mechanical and tribological behaviors of the triangular thread, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 88, No. 1–4, pp. 269–276, 2017.
- [9] V. E. Hemmati, R. H. Oskouei, T. N. Chakherlou, An experimental method for measuring clamping force in bolted connections and effect of bolt threads lubrication on its value, in: *Proceedings of the World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 48, pp. 457–460, 2008.
- [10] B. Armstrong-Hélouvry, P. Dupont, C. C. de Wit, A survey of models analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction, *Automatica*, Vol. 30, No. 7, pp. 1083–1138, 1994.
- [11] M. S. Seppanen, Modeling for application: developing industrial strength simulation models using Visual Basic for Applications (VBA), *Proceedings of the 32nd Conference on Winter Simulation*, 10-13.12.2000, Orlando, USA, pp. 77-82.
- [12] A. Košarac, M. Zeljković, R. Gatalo, Primjena savremenih tehnologija vizuelizacije u projektovanju fleksibilnih tehnoloških struktura, *Proceedings of the Infoteh-Jahorina*, 16-18.03.2011, Jahorina, BiH, Vol. 10, pp. 249-253.
- [13] T. Latinović, *Osnove programiranja (Visual Basic)*, Besjeda, Banja Luka, 2007.

## SOFTWARE SUPPORT FOR THE DEVICE FOR EXAMINATION OF FRICTION LOSSES IN BOLTED JOINTS

**Abstract:** *This paper describes the development of software support for the device for examination of friction losses in bolted joints. The development of software support was preceded by consideration of possible ways to improve the data entry process and calculations based on measurement results, known theoretical dependencies and device settings. The software, developed in Visual Basic for Applications (VBA) development environment, ensured efficient data entry and processing.*

**Keywords:** *Friction, thread, screw connection, software, VBA*