

POTREBNI PREDUSLOVI ZA ISPITIVANJE ELEKTROVUČNIH VOZILA 25 KV, 50 HZ NAKON GLAVNIH OPRAVKI U FABRICI ŽELEZNIČKIH VOZILA “ŽELVOZ” SMEDEREVO

Branislav Gavrilović¹ Zoran Stjepanović² Darko Stjepanović³

Rezime: U radu su analizirani potrebni preduslovi za implementaciju ispitne stanice 10/25 (+10%, - 30%) kV, 50 Hz, Fabrike železničkih vozila „Želvoz“ u Smederevu. Pri tome su razrađeni postupci i metodologija ispitivanja sa dozvoljenim promenljivim naponom napajanja koje predviđaju savremeni standardi i međunarodni propisi za oblast elektrovučnih vozila. Nakon analize napona i struje na pantografu i u vučnim strujnim krugovima predloženi su elementi koji će kroz ispitivanje omogućiti dobijanje tačnih zaključaka o kvalitetu izvršene glavne opravke. Polazeći od poznavanja talasnih oblika napona i struja definisani su i kriterijumi za izbor i karakteristike elemenata mernog sistema od transduktora do učestalosti odabiranja mernog signala.

Ključne reči: elektrovučna vozila, ispitna stanica promenljivog napona

NECESSARY REQUIRED FOR TESTING ELECTRIC TRACTION VEHICLES 25 KV, 50 HZ AFTER MAJOR REPAIRS AT THE RAILWAY VEHICLE FACTORY “ŽELVOZ” SMEDEREVO

Abstract: The paper analyzes the necessary prerequisites for the implementation of the 10/25 (+10%, - 30%) kV, 50 Hz test station of the Railway Vehicle Factory "Želvoz" in Smederevo. In doing so, the procedures and methodology for testing with the permitted variable supply voltage, which are stipulated by modern standards and international regulations for the field of electric traction vehicles, have been developed. After analyzing the voltage and current on the pantograph and in the traction circuits, elements have been proposed that will enable accurate conclusions to be drawn through testing on the quality of the performed major repairs. Starting from the knowledge of the waveforms of voltages and currents, the criteria for the selection and characteristics of the elements of the measurement system, from the transducer to the frequency of sampling the measurement signal, have been defined.

Keywords: electric traction vehicles, test station with variable voltage

1. UVOD

U okviru glavne opravke elektrovučnih vozila, remontne organizacije su u obavezi da ispitaju uređaje i opremu prema ugovorenom obimu radova i da zamene one delove kojima je istekao eksploatacioni vek. Pri tome remontne organizacije su u obavezi da opišu sva ispitivanja (serijska i tipska) koja namerava da izvrši po kompletiranju, pre puštanja vozila u rad, kako bi obezbedio da delovi, sklopovi i agregati, kao i kompletna vozila rade bezbedono u projektovanim granicama, shodno standard IEC 61133:2021 [1]. Cilj ispitivanja je da se potvrdi ostvarenje ugovorenih karakteristika i primenjenih tehničkih rešenja kod remontovanih lokomotiva.

Zbog navedenog razloga Fabrika železničkih vozila “Želvoz” Smederevo pristupila je potrebnim aktivnostima vezanih za izgradnju⁴ ispitne stanice 10/25 (+10%, - 30%) kV i kontaktne mreže 25 kV, 50 Hz u dužini od 200m za potrebe ispitivanja shodno standard IEC 61133. kako postojećih serija električnih lokomotiva i elektromotornih vozova iz Republike Srbije (el.lokomotive serije ŽS 441, 444, 461 i elektromotorne vozove serije ŽS 412/416, 413/417) tako i iz zemalja u okruženju.

¹ Prof. dr. Branislav Gavrilović, Evropski Univerzitet, Brčko BiH, gavrilovicbrislav5@gmail.com

² mr Zoran Stjepanović, Evropski Univerzitet, Brčko BiH, stjapanovic@hotmail.com

³ Darko Stjepanović, Saobraćajni Institut CIP, Beograd, darko_s29@hotmail.com

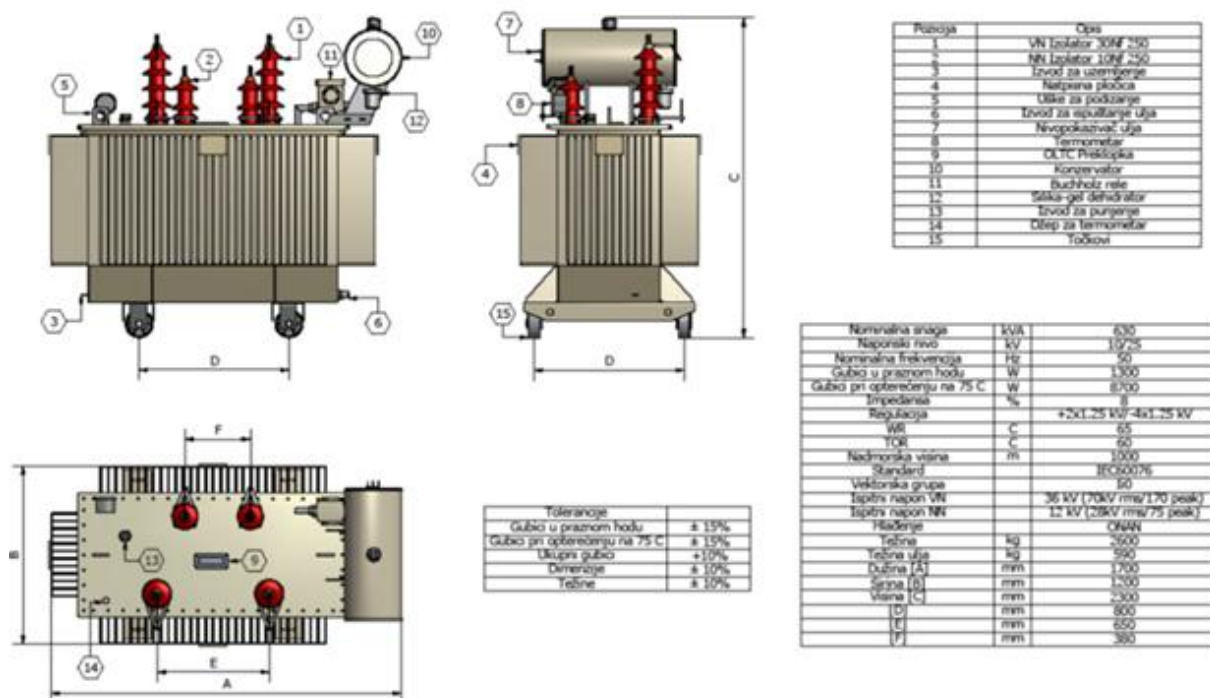
Ispitna stanica bi trebala da obezbedi:

- Transformaciju napona 10/25 (+10%, -30%) kV, ćelija 10 kV, posredstvom monofaznog transformatora snage 630 kVA, a neposredno napajan 10 kV kablom XHE/XHE 48-A 3x150 mm² iz TS 110/10 kV „Smederevo 4“. Izgled i tehnički podaci prikazani su na slici 1.
- Komandni orman smešten u prostoriji opremljen: ampermetrom, voltmetrom na 10 kV strani, ampermetrom i voltmetrom na 25 kV strani, prekostrujnu zaštitu na 10 kV i 25 kV, tastere za uključenje i isključenje prekidača 10 kV i 25 kV, rastavljač u ćeliji 25 kV kao rastavljač na krajnjem stubu kontaktne mreže na ulazno/izlaznom koloseku za dopremanje električnih lokomotiva i elektromotornih vozova u „Želvoz“.
- Daljinsko upravljanje – prenosnu kutija sa tasterima za povećanje napona, smanjenje napona i „total stop“-om za isključenje prekidača 10 kV.
- Regulaciju napona sa elektromotornim pogonom u opsegu 17,5 – 27,5 kV pod opterećenjem transformatora.
- Vezu ispitne stanice do voznog voda kontaktne mreže preko napojnog kabla XHP-48 1x 50mm², 35 kV i rastavljača 25 kV, 600 A za spoljnu montažu-
- Kontaktanu mrežu koja je u sklopu ispitne stanice 10/25 kV, 630 kVA koja je usaglašena sa sa tehničkim rešenjem kontaktne mreže 25 kV, 50 Hz na mreži „Infrastrukture železnice Srbije“.
- Lampe za upozorenja duž elektrificiranog koloseka za dopremanje električnih lokomotiva i elektromotornih vozova na nekoliko mesta, koje će svetliti uvek kada je vod pod naponom.

Navedena ispitna stanica bila bi u mogućnosti da sa komandnog ormara ukluči sve prekidače i rastavljače, ali i blokadu pogrešnih komandi svih rastavljača i prekidača na 10 kV i 25 kV strani pri ulasku ili izlasku električnih lokomotiva i elektromotornih vozova iz „Želvoza“

Sem navedenog ispitna stanica treba da j opremljena prekostrujnom zaštitom kako na 25 kV tako i na 10 kV strani odnosno Buholcovom i termičkom zaštitom regulacionog transformatora od unutrašnjih kvarova.

Uzemljenje povratnog voda, uzimajući u obzir lokalne uslove, treba da bude rešeno prema propisima za ovu vrstu instalacije.



Slika 1: Izgled i tehnički podaci regulacionog energetskeg transformatora u ispitnoj stanici

2. MERENJE NAPONA I STRUJE NA PANTOGRAFU ISPITIVANIH ELEKTROVUČNIH VOZILA

Merenje napona i struje na pantografu pri dozvoljenoj promeni napona po odredbama **SRPS EN 50163:2011/A2:2020** [2] od 17,5 kV do 27,5 kV je neophodna iz sledećih razloga:

1. Određivanje pogonske sposobnosti elektrovočnog vozila pri dozvoljenoj promeni napona napajanja po odredbama EN 50163 od 17,5 kV do 27,5 kV.
2. Određivanje stepena izobličenja struje i napona na pantografu elektrovočnih vozila što je posledica nelinearnosti ekvivalentnog opterećenja energetskih pretvarača i vučnih motora vozila.
3. Određivanje srednje vrednosti snage koju uzima elektrovočno vozilo iz kontaktne mreže pri njegovom podizanju pod napon i startovanju svih trofaznih asihronih motora pomoćnog pogona vozila.

Naizmenična struja u visokonaponskom ulaznom kolu voza ima izobličenje kao posledicu više zavisnih veličina od kojih su od najvećeg uticaja:

1. Ekvivalentno opterećenje energetskih pretvarača u strujnom kolu vučnih elektromotora,
2. Ekvivalentno opterećenje (statičkog ili rotacionog) pretvarača faza za napajanje svih trofaznih asinhronih motora pomoćnog pogona (kompresor, ventilatori, uljne pumpe)
3. Induktivnosti na visokonaponskoj strain napojnog strujnog kola.

U opštem slučaju napon i struja na pantografu elektrovočnog vozila je periodična funkcija vremena koja se može predstaviti Furijeovim redom:

$$u(t) = \frac{1}{2} U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (U_n \cos n\omega t \cdot \cos \alpha_n + U_n \sin n\omega t \cdot \sin \alpha_n) \quad (1)$$

$$i(t) = \frac{1}{2} I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (I_n \cos n\omega t \cdot \cos \beta_n + I_n \sin n\omega t \cdot \sin \beta_n) \quad (2)$$

Gde je sa:

n - označen red harmonika,

U_0, I_0 – jednosmerna komponenta napona i struje,

U_n, I_n maksimalna vrednost n -tog harmonika napona i struje i $\omega = 2\pi f = 200\pi$ - ugona frekvencija napona i struje.

Detaljna analiza ovih veličina za različite serije elektrovočnih vozila nije predmet ovog rada. Međutim, pravilan izbor sistema koji pruža mogućnost da se pomenute veličine izmere sa visokom tačnošću, ima kao polaznu osnovu poznavanje fizičkih karakteristika pojava koje istražujemo merenjem u ispitnoj stanici.

3. ELEMENTI MERNOG SISTEMA NA 25 KV STRANI ISPITNE STANICE

Osnovni elementi mernog sistema za merenje struje i napona na 25 kV strani ispitne stanice (napona i struje na pantografu ispitivanog vozila) su strujni i naponski merni transformatori sa odgovarajućim sekundarnim opterećenjem (priključenih mernih uređaja).

Izbor mernih transformatora vrši se na osnovu više elemenata koji su precizirani u standardu IEC 60044-1:1996 ED1 [5]. S obzirom na aplikaciju merenja na vučnom vozilu, posebno se mora analizirati:

- Karakteristika impedanse kojom je zatvoren sekundar mernih transformatora;
- Tranzijentna karakteristika i magnetno zasićenje magnetnog kola mernih transformatora.

Analizom svih faktora kod vučnih aplikacija zaključeno je da je za precizno merenje naizmenične struje na 25 kV strani ispitne stanice neophodno odabrati strujni transformator nazivne struje 300/5A klase tačnosti 0.2, a što garantuje precizno merenje u granicama između 15A i 360A primarne struje, pri sekundarnom opterećenju ($15VA, \cos \varphi = 0.8$) koje je formirano tako što su krajevi vezani za nisko induktivni šant koji garantuje i amplitudnu i faznu tačnost signala.

Za naponski nivo od 25kV koriste se induktivni naponski merni transformatori, čiji izbor uključuje i elemente koji su već pomenuti kod izbora strujnog transformatora.

Merno kolo transformatora koje garantuje preciznost signalne reprodukcije visokog napona napajanja lokomotive zahteva nisku potrošnju jer je radni režim naponskog transformatora blizak režimu praznog hoda. Ako je prividna nazivna snaga sekundara 1,3-1,5 puta veća od prividne snage opterećenja povezanog instrumenta dobijaju se najbolji rezultati u pogledu tačnosti.

Najviše verovatan opseg promene napona kontaktne mreže od 17.5kV do 27.5kV efektivne vrednosti garantuje relativnu grešku ispod 0.5% izaberemo merni naponski transformator klase tačnosti 0.5 sa nazivnim opterećenjem od 25VA i ekvivalentnim prividnim opterećenjem instrumenata koje je između 16VA i 20VA.

4. ELEMENTI MERNOG SISTEMA U VUČNOM STRUJNOM KOLU ISPITIVANOG VOZILA

Pri izvođenju strujnih i naponskih merenja kako u ispitnoj stanici tako i na otvorenoj pruzi, a u cilju neposrednog merenja u ispitivano vozilu potrebno je odabrati merne transduktore koji su imuni na elektromagnetne uticaje i imaju dinamičke karakteristike (propusni opseg i brzinu odziva) u prihvatljivim granicama.

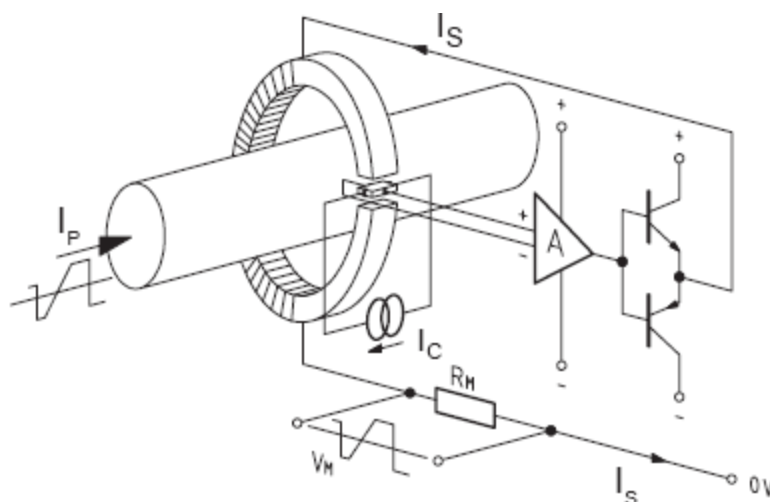
Kod odabiranja mernih mesta u vozilu važno je da su strujne i naponske veličine invarijantne u odnosu na promenu režima vuče u režim kočenja i obratno.

Prilikom izbora mernih transduktora neophodno je poznavati ne samo opseg promene struja i napona koji se mere. Merni transduktori moraju ispuniti i niz drugih uslova koji su pretpostavka bezbednog merenja i tačnih rezultata. Najvažniji od njih su:

- izolacija mernog signala u odnosu na merno mesto u vučnom strujnom kolu,
- neosetljivost na externu interferenciju,
- linearna zavisnost mernog signala prema realnoj mernoj veličini,
- optimalno vreme odziva izlaza na priraštaj merene veličine,
- širok frekventni opseg.

Zbog navedenih razloga potrebno je koristiti merne transduktore zasnovane na Hall-ovom efektu sa povratnom spregom čije su karakteristike posebno odabrane da zadovolje zahteve tačnog i preciznog i bezbednog merenja jednosmernih, naizmeničnih i impulsnih struja i napona u vučnom strujnom kolu ispitivanih vozila.

Osnovni princip rada mernih transduktora sa povratnom spregom vidljiv je iz ilustracije na Slici 2.



Slika 2. Princip rada mernog transduktora sa
povratnom spregom

Prema Holovom principu napon na krajevima pločice u magnetnom polju je proporcionalan magnetnoj indukciji u vazдушnom procepu, odnosno proporcionalna struji I_p . Ovaj napon je iskorišćen da se generiše kompenzaciona struja I_s koja će magnetnu indukciju u vazдушnom procepu usled primarne struje kompenzovati tako da rezultujući fluks bude jednak nuli. Kada je magnetni fluks kompenzovan važi relacija :

$$N_p I_p = N_s I_s \quad (3)$$

Prema tome, sekundarna struja je egzaktna slika primarne struje koja se meri. Ubacivanjem mernog otpora R_M u sekundarno kolo dobija se izlazni naponski signal koji je slika struje u primaru. Iz slike 2 je uočljivo da su primarno i sekundarno kolo galvanski razdvojeni što je pretpostavka obrade signala struja i napona na računaru.

Za potrebe ispitne stanice predlažu se merni transduktori LEM LT 2000-S za strujna merenja i LEM LV 100-800 za naponska merenja.

5. ODREĐIVANJE AKTIVNE SNAGE I FAKTORA IZOBLIČENJA STRUJE I NAPONA NA PANTOGRAFU ISPITIVANOG VOZILA

Da bi izračunali aktivnu snagu potrebno je izvršiti tri koraka, a to su:

1. Simultano odabrati veličine struje i napona na pantografu vozila;
2. Izvršiti množenje odgovarajućih vrednosti
3. Izvršiti usrednjavanje na odgovarajućem periodu.

Umesto klasične formule koja važi za sinusoidne talasne oblike struje i napona koristimo definicionu formulu:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) \cdot u(t) \cdot dt \quad (4)$$

Izračunavanje snage je postprocesna operacija pa je u toku samog procesa merenja glavnu pažnju potrebno usmeriti na simultano odabiranje napona i struje da bi fazna greška usled neistovremenih trenutaka odabiranja bila ispod 5°.

Osnovni elementi koji određuju kvalitet konverzije snage i njen uticaj na primarni sistem napajanja su:

1. Strujni i naponski faktori izobličenja:

$$THD_i = \sqrt{\left[\left(\frac{I_{eff}}{I_1}\right)^2 - 1\right]}; THD_u = \sqrt{\left[\left(\frac{U_{eff}}{U_1}\right)^2 - 1\right]} \quad (5)$$

gde I_{eff} i U_{eff} označavaju efektivne vrednosti struje i napona na pantografu ispitivanog vozila, a I_1 i U_1 su efektivne vrednosti osnovnog harmonika

1. Faktor snage>

$$PF = \frac{P}{U_{eff} \cdot I_{eff}} \quad (6)$$

Oni se određuju primenom računara i nekog od aplikativnih softvera koji sadrži programske module diskretne Furijeove analize.

6. ELEMENTI KONVERZIJE ANALOGNIH MERNIH SIGNALA STRUJE I NAPONA NA PANTOGRAFU ISPITIVANOG VOZILA

Iako Furijeov razvoj sadrži beskonačan broj harmonika, realan signal se reprezentuje, sasvim precizno, sa ograničenim brojem harmonika.

Analizom izraza (1) i (2) zaključuje se da je dovoljno razmatrati trigonometrijski polinom koji nastaje tako što se zanemare svi harmonici reda iznad sedam.

Na ovaj način dolazimo do mogućnosti da definišemo učestanost uzorkovanja mernog signala u procesu A/D konverzije.

Prema teoremi o odabiranju periodičan signal ograničenog frekventnog sadržaja moguće je tačno reprodukovati ako je broj odbiraka N unutar osnovnog perioda veći od dvostruke vrednosti reda najvišeg harmonika n . U našem slučaju je $T = 0.02s$ i $N > 14$ pa sledi da za minimalni period odabiranja važi nejednakost:

$$T_s < \frac{T}{N} \quad (7)$$

Dakle, pri ispitivanjima elektrovočnih vozila monofaznog elektrovočnog sistema 25kV, 50 Hz potrebno je koristiti mernu opremu koja ima mogućnost simultanog uzorkovanja vrednosti struja i napona sa učestanošću odabiranja ne manjom od $f_s = 2000$ Hz za koju je gornja nejednakost zadovoljena. Osim toga odabrana učestanost dozvoljava da postupkom usrednjavanja u pet tačaka izvrši filtriranje signala uklanjajući signal šuma i izdvajajući koristan signal.

Ovakav izbor učestanosti odabiranja saglasan je i sa odredbama SRPS EN 50163:2011/A2:2020.

7. ZAKLJUČAK

Ispitivanja elektrovočnih vozila nakon obavljene glavne opravke su važan korak koji će oceniti i potvrditi ostvarenje ugovorenih karakteristika i primenjenih tehničkih rešenja kod remontovanih lokomotiva. Cilj izvedene analize je da se krene ka detaljnoj razradi postupaka i metodologije ispitivanja koje predviđaju savremeni standardi i međunarodni propisi za oblast elektrovočnih vozila monofaznog elektrovočnog sistema 25kV, 50 Hz. Nakon analize napona i struje na pantografu i u vučnim strujnim krugovima predloženi su glavni elementi ispitne stanice 10/25 (+10%, - 30%) kV Fabrike železničkih vozila „Želvoz“ u Smederevu, a koji će kroz ispitivanje omogućiti dobijanje tačnih zaključaka o kvalitetu izvršene glavne opravke.

8. LITERATURA

- [1] SRPS EN IEC 61133:2021: Railway applications - Rolling stock - Testing of rolling stock on completion of construction and before entry into service. Publication date: **Dec 31, 2021.**
- [2] SRPS EN 50163:2011/A2:2020: Primene na železnici - Naponi napajanja sistema električne vuče - Izmena 2
- [3] SRPS EN 50388-1:2023/A1:2023: „Primene na železnici – Stabilna postrojenja i vozna sredstva – Tehnički kriterijumi za koordinaciju između sistema napajanja električne vuče i voznog sredstva radi postizanja interoperabilnosti – Deo 1: Opšte - Izmena 1“.
- [4] SRPS EN 50463-2:2017:“Primene na železnici – Merenje energije u vozovima – Deo 2: Merenje energije“
- [5] IEC 60044-1:1996 ED1: “Instrument transformers - Part 1: Current transformers“, **13. 2. 2003.**
- [6] RAILWAY EXPERTISE& TESTING, YOUR REFERENCE GUIDE, Discover the latest updates to your 2021 reference guide at, www.eurailtest.com
- [7] A P Babkov, B V Malozyomov, R R Dagaev: “Modern methods for diagnosing electric circuits of electric Trains”, HIRM-2021, IOP Publishing, Journal of Physics: Conference Series, 2176 (2022) 012059, doi:10.1088/1742-6596/2176/1/012059
- [8] Dragutin Kostić, Nenad Jevtić, Petar Marković: ”Testing methods and analysis of the main electrical properties of modernized locomotives”, International Journal for Traffic and Transport Engineering, 2011, 1(2): 108 – 114
- [9] [Konrad Schweiger](#): „High-voltage Testing of Railway Infrastructure“, <https://dewesoft.com/blog/high-voltage-testing-of-railway-infrastructure>
- [10] Hall Sebastian: „Testing and Modelling of Electrical Traction Machines Performance Characterisation with Measurements from Transient Operation“, Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in Engineering, the Faculty of Engineering of Lund University, Sweden , 2019.