

Mikrovalni radiorelejni primopredajnik RP8-24

Prof. dr. sc. **Davor Bonefačić**, redoviti član HATZ-a,
Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva, davor.bonefacic@fer.hr

Prof. dr. sc. **Juraj Bartolić**,
Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva, juraj.bartolic@fer.hr

***Sažetak:** Rad opisuje razvoj i karakteristike radiorelejnog uređaja RP8-24. Uređaj je razvijen krajem 60-ih godina 20. stoljeća u Radioindustriji Zagreb (RIZ) uz suradnju sa Zavodom za visokofrekventnu tehniku zagrebačkog Elektrotehničkog fakulteta (ETF). Uređaj RP8-24 bio je suvremen telekomunikacijski uređaj za prijenos 24 PCM kanala radijskim putem i po svojoj je izvedbi bio usporediv ili čak bolji od sličnih uređaja u Europi i svijetu u to vrijeme. S obzirom da je proizvodnja uređaja odavno ugašena političkom odlukom, a postojeći uređaji su otpisani i uništeni te da projektna i proizvodna dokumentacija postoji tek u fragmentima u privatnim zbirkama i pismohranama, ovaj rad je pokušaj očuvanja sjećanja na dostignuće hrvatskih inženjera koje je moglo biti uspješno i na svjetskoj razini.*

***Ključne riječi:** Mikrovalovi, primopredajnik, radiorelejni uređaj, PCM, RIZ, ETF*

1. Uvod

Gospodarski i tehnički razvoj u 60-im godinama 20. stoljeća popraćen je sve većim zahtjevima na telekomunikacijske mreže. Broj telefonskih priključaka se povećava, a telefonskom vezom povezuju se svi krajevi Hrvatske, od istoka do juga i otoka. Premošćivanje velikih udaljenosti žičanim vezama nad kopnom, a posebice nad morem bilo je složeno, dugotrajno i skupo. Radiorelejne veze, poznate već od 30-ih godina 20. stoljeća, bile su pouzdane, fleksibilna i jeftinija alternativa.

Zbog toga je oko 1967. godine u Radioindustriji Zagreb (RIZ) započet razvoj radiorelejnog uređaja za telefonske veze. Razvoj je vodio Institut za elektrotehniku, telekomunikacije i automatizaciju (IETA) u RIZ-u uz suradnju s tadašnjim Zavodom za visokofrekventnu tehniku Elektrotehničkog fakulteta (ETF) u Zagrebu. U nepunih godinu dana razvojna je skupina projektirala i izradila prvi uporabni prototip radiorelejnog uređaja s oznakom RP8-24.

1.1 Razvojna skupina

Voditelj razvojne skupine bio je Zvonimir Radić, dipl. ing. iz RIZ-a. Ostali članovi iz RIZ-a bili su Tomislav Kuštović i Željko Plavčić, oba diplomirani inženjeri. Tehničari iz RIZ-a značajno uključeni u razvoj i izradbu prototipa te proizvodnju uređaja RP8 bili su Zvonimir Brenko, Petar (Pero) Renjić Dragutin Janković, Stjepan Vujnović i Zdravko Ostojčić [1, 4, 5].

Članovi razvojne skupine sa Zavoda za visokofrekventnu tehniku zagrebačkog ETF-a bili su Boris Kviz, Ervin Zentner, Boris Zimmerman, Zlatko Koren, Antun Kljunak i Juraj Bartolić tada asistenti ili docenti na ETF-u.

Neki od članova razvojne skupine svoje su inženjerske karijere započeli u RIZ-u, da bi kasnije prelaskom na ETF (danas FER, Fakultet elektrotehnike i računarstva) postali priznati nastavnici i međunarodno prepoznati znanstvenici u području mikrovalne tehnike, antena, optoelektronike i komunikacija.

2. Opis i tehničke karakteristike radiorelejnog uređaja RP8-24

Tehnički opis uređaja, opis komponenata i načela rada osnivaju se na literaturi [1, 2] te sjećanju živućih članova razvojne skupine [4, 5]. Za uređaj RP8-24 je tijekom razvoja izrađena detaljna tehnička dokumentacija, od projektne, proizvodne i servisne do uputa za korisnike. Međutim, protokom vremena većina dokumentacije je otpisana ili izgubljena. U trenutku pisanja ovoga rada postoje fragmenti dokumentacije sačuvani u privatnim zbirkama [5, 6], a osim tiskanih priručnika [2] uključuju čak i originalna, rukom pisana, laboratorijska izvješća o mjerenjima i ugađanjima na pojedinim sklopovima uređaja (sl. 1).

2.1 Tehničke karakteristike

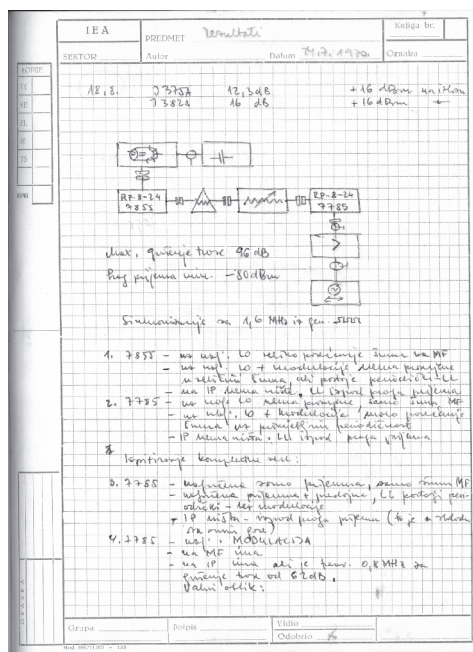
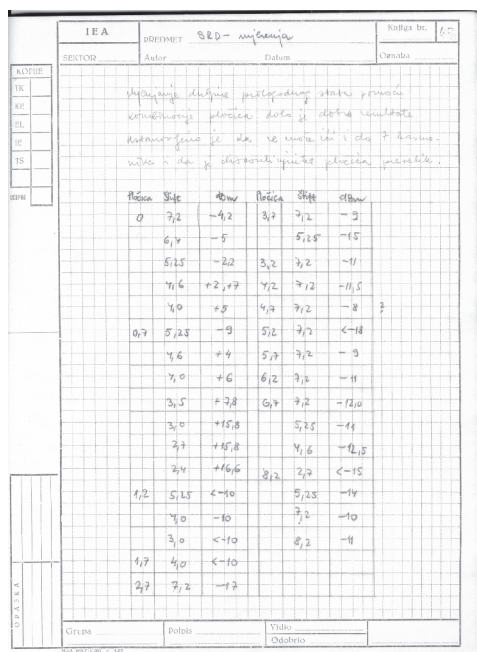
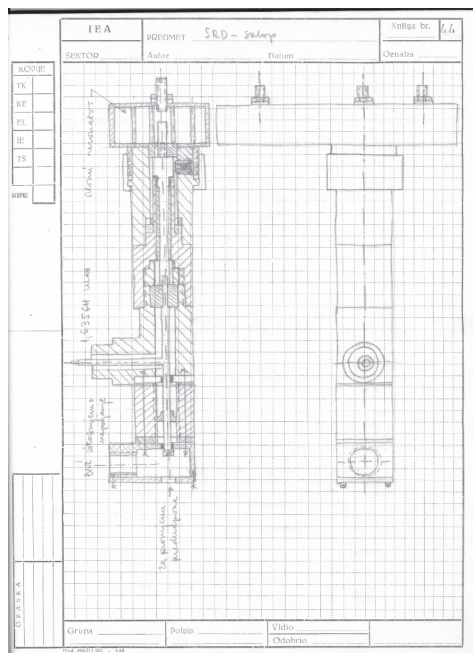
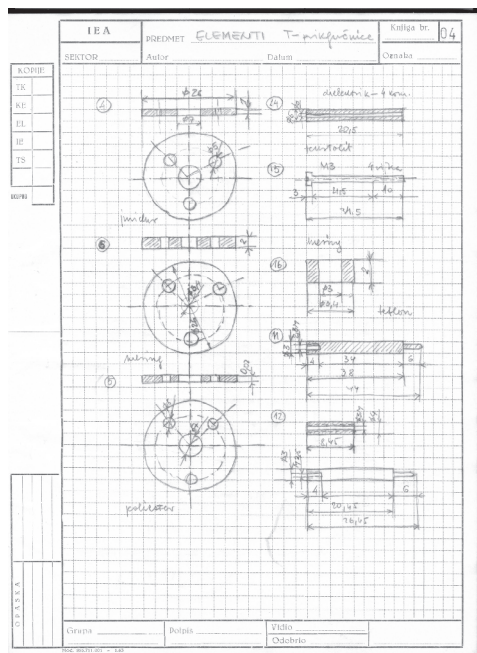
Radiorelejni (RR) uređaj RP8-24 u potpunosti je izrađen u poluvodičkoj tehnici s diskretnim elementima. Namjena mu je bila prijenos telefonskog multipleksa od 24 kanala. Informacije u digitalnom obliku su modulirane na nosilac impulsno-kodnom modulacijom (PCM = *pulse code modulation*). Primjena PCM-a omogućila je prijenos uz manji potrebni signal / šum, nego uz primjenu bilo koje analogne modulacije. PCM je također otporniji na smetnje i interferencije od analognih sustava. Za prijenos signala bez smetnji RR uređaj RP8-24 zahtijevao je potiskivanje inter-

ferirajućeg signala od samo $7 \div 9$ dB [1]. Time je omogućena ugradnja više ovakvih radiorelejnih uređaja na istu lokaciju.

Tehničke karakteristike za uređaj s 24 kanala navedeni su u tablici 1 prema [1] i [2]. Uređaj se mogao tvornički preraditi za prijenos 12 kanala, a razlike u karakteristikama za tu inačicu navedene su u tablici 2. Múltipleks u osnovnom pojasu dobivao se pomoću RIZ-ovih uređaja VM-PCM 12 (12 kanala) odnosno VM-PCM 24 (za 24 kanala) [1, 2, 3]. Razvoj PCM-uređaja vodila je skupina iz IETA RIZ sa stručnjacima Zavoda za telekomunikacije s ETF-a u Zagrebu.

Tablica 1. Tehničke karakteristike radiorelejnog uređaja RP8-24 (inačica s 24 kanala) [1, 2]. Kad se karakteristike razlikuju, navedene su obje s naznakom izvora.

Prijenosni kapacitet	24 PCM kanala
Frekvencijsko područje [1]	7150 ÷ 8125 MHz
Frekvencijsko područje [2]	7782 ÷ 7900 MHz
Izlazna RF snaga	+16 dBm (40 mW)
Stabilnost frekvencije	$5 \times 10^{-7} 1/^\circ\text{C}$
Dubina modulacije ("1" / "0") [1]	+16 dBm / -4 dBm
Dubina modulacije ("1" / "0") [2]	+16 dBm / -9 dBm
Prag prijema	-81 dBm
Faktor šuma prijemnika	13 dB
Međufrekvencija	70 MHz
Širina pojasa prijemnika (3 dB) [1]	5 MHz
Širina pojasa prijemnika (3 dB) [2]	4,5 MHz
Minimalna ulazna razina bipolarnog PCM signala	200 mV _{pp} / 120Ω
Izlazna razina bipolarnog PCM signala	6 V _{pp} / 120Ω
Napajanje (istosmjerno)	+12 V / -12 V
Potrošnja	36 W
Antena, promjer paraboličnog reflektora	1,2 m; 2 m [1, 2]; 3 m [2]
Dozvoljena temperatura okoline	-25 °C ÷ +50 °C
Dozvoljena vlažnost	95 %



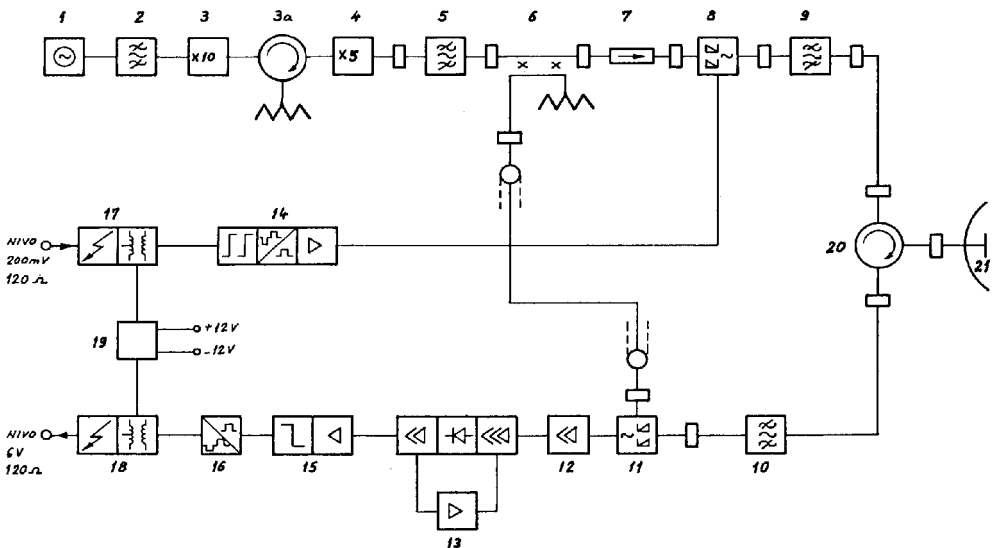
SI. 1. Projektna dokumentacija i rezultati ispitivanja: elementi T-priključnice (gore lijevo), skica sklopa množila $\times 5$ sa step-recovery diodom (gore desno), rezultati mjerenja na sklopu množila $\times 5$ sa step-recovery diodom (dolje lijevo), rezultati laboratorijskog ispitivanja praga prijema sa skicom mjerne postavu (dolje desno)

Tablica 2: Tehničke karakteristike radiorelejnog uređaja RP8-12 (inačica s 12 kanala), razlike u odnosu na inačicu s 24 kanala [1]

Prijenosni kapacitet	12 PCM kanala
Prag prijema	-83 dBm
Faktor šuma prijemnika	11 dB
Širina pojasa prijemnika (3 dB)	3,5 MHz

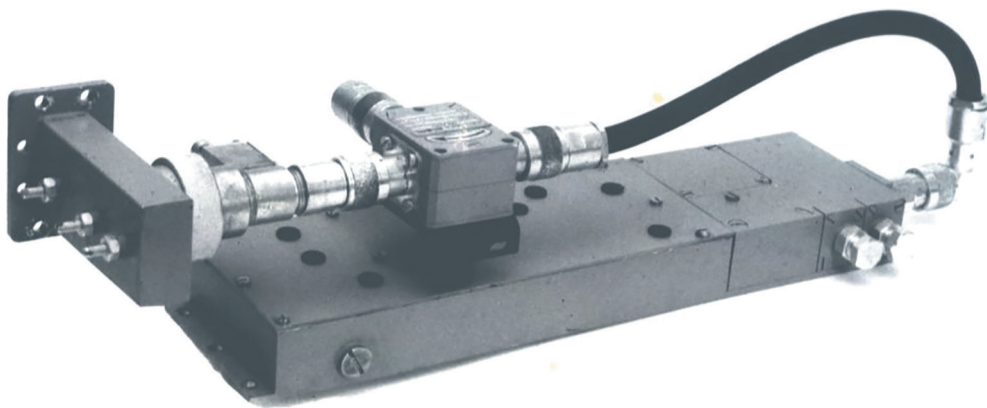
2.2 Opis, izvedba i načela rada sklopova primopredajnika

Blok shema primopredajnika RP8-24 na sl. 2 preuzeta je iz [1], ali su unesene kasnije preinake prema servisnoj dokumentaciji [2]. Prema [2] dodan je cirkulator s teretom u funkciji izolatora (3a), te je transformator za simetriranje na mjestu bloka 12 u izvornoj shemi nadomješten međufrekvencijskim pretpojačalom. Generiranje signala nosioca ostvareno je s pomoću kristalnog oscilatora na frekvenciji 8,8 MHz i nizom tranzistorskih množila frekvencije $\times 2$ i $\times 3$. Ukupni faktor množenja bio je



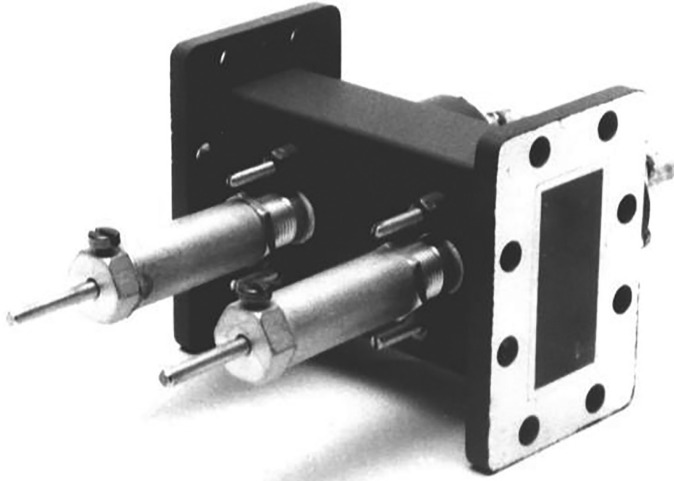
Sl. 2. Blok shema RR uređaja RP8-24: (1) kvarcni oscilator s množilima frekvencije do 160 MHz, (2) pojasno-propusni filter, (3) množilo frekvencije $\times 10$ sa *step-recovery* diodom, (4) množilo frekvencije $\times 5$ sa *step-recovery* diodom, (5) valovodni filter, (6) valovodni usmjerni sprežnik s prelazom na suosni kabel za odvajanje signala lokalnog oscilatora za prijemnu granu, (7) valovodni feritni izolator, (8) modulator s PIN diodama, (9) izlazni valovodni filter, (10) prijemni filter, (11) balansno mješalo, (12) međufrekvencijsko pretpojačalo, (13) međufrekvencijsko pojačalo s automatskom regulacijom pojačanja, (14) modulacijsko pojačalo, (15) izlazno pojačalo, (16) konverter unipolarnih impulsa u bipolarne, (17) ulazna strujno-naponska zaštita, (18) ulazna strujno-naponska zaštita, (19) sklop za istosmjerno napajanje s dva stabilizatora, (20) antenska skretnica (feritni cirkulator), (21) antena s paraboličnim reflektorom i valovodnim iluminatorom s lijevkom u žarištu.

18 čime je na izlazu bloka 1 (Sl. 1) dobiven signal frekvencije 160 MHz i snage 12 W. Neželjene frekvencijske komponente na izlazu potisnute su pojasno-propusnim filtrom (2). Signal frekvencije 160 MHz vodio se na dva množila sa *step-recovery* diodom (SRD) s faktorima množenja $\times 10$ i $\times 5$ (blokovi 3 i 4). Glavna prednost *step-recovery* diode su veliki faktori množenja frekvencije i dobra djelotvornost [1]. Cirkulator sa završnim otporom (3a) dodan je kao izolacija dvaju stupnjaeva množila. Na izlazu prvog množila dobivao se signal frekvencije 1,6 GHz i snage 2 W, a na izlazu drugog množila signal frekvencije 8 GHz i snage 150 mW. Izlaz iz drugog množila izveden je u valovodnoj tehnici s pomoću valovoda WR-137. Blok 5 je valovodni pojasno-propusni filtar za potiskivanje neželjenih produkata množenja. Blok 6 je križni valovodni sprežnik sprege 20 dB za izdvajanje dijela signala frekvencije 8 GHz koji se zatim rabio kao signal lokalnog oscilatora u mješalu prijemničkog lanca (11). Fotografija generatora signala prikazana je na slici 3.



Sl. 3. Generator signala 8 GHz. Kristalni oscilator i množila frekvencije nalaze se u donjoj kutiji, dok se zadnji stupanj množila $\times 5$ sa *step-recovery* diodom nalazi lijevo, prije spoja na valovodni izlaz. Cirkulator s teretom spojen između suosnog kabela i zadnjeg stupnja množila $\times 5$ ima ulogu feritnog izolatora [2].

Digitalna modulacija (“uključeno” / “isključeno”) ostvarena je valovodnim modulatorom s dvama PIN diodama (8). U stanju “uključeno” (digitalni “1”) PIN diode ne vode i predstavljaju visoku impedanciju spojenu paralelno na prijenosnu liniju. U tome je slučaju gušenje u valovodu manje od 1 dB. U stanju “isključeno” (digitalna “0”), PIN diode vode i predstavljaju gotovo kratki spoj, a gušenje u prijenosu je oko 35 dB. Tako velik iznos gušenja ostvaren je s pomoću dvije PIN diode koje su se nalazile na međusobnom razmaku od tri četvrtine valne duljine. Sklop uključuje i dodatne kompenzacijske serijske reaktancije kojima se poništavaju reaktancije dioda u stanju vođenja, odnosno paralelne reaktancije u obliku zaslona kojima se povećava impedancija dioda u stanju nevođenja postizanjem paralelne rezonancije. PIN modulator prikazan je na slici 4. Snaga modulacijskog signala potrebna za modulaciju postignuta je modulacijskim pojačalom 14.



Sl. 4: Valovodni PIN modulator. BNC konektori za priključivanje modulacijskog signala nalaze se s gornje (na slici nevidljive) strane sklopa [6].

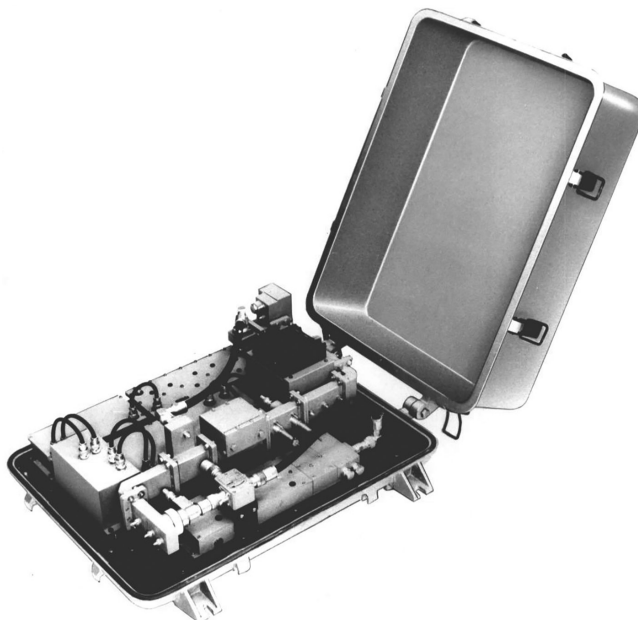
Feritni izolator (7) potiskivao je neželjene refleksije na PIN modulatoru i onemogućavao njihov povratak u generator signala nosioca. Izlazni filtar (9) sastojao se od tri rezonatora s induktivnim stupićima povezanim linijama dugim četvrtinu valne duljine. Filtar se mogao ugađati u rasponu od 7,7 do 8,1 GHz.

Dupleksiranje odašiljanja i prijema ostvareno je feritnim cirkulatorom (20). Parabolična antena (21) pobuđena je s pomoću valovoda i ljevkastog iluminatora u žarištu. Standardno se rabila antena promjera 1,2 m koja je uz izlaznu snagu od 40 mW omogućavala domet radiorelejnog sustava od 50 km uz izravnu optičku vidljivost. U složenijim konfiguracijama terena rabili su se pasivni reflektori. Kako bi se nadoknadili dodatni gubici na reflektoru te povećana duljina trase rabila se antena promjera 2 m [1, 2] ili 3 m [2].

Na ulazu prijemnika nalazio se ulazni filtar (10) iza kojega se nalazilo balansno mješalo (11) i međufrekvencijsko pretpojačalo (11). Na balansnom se mješalu ulazni signal miješao s dijelom signala iz odašiljačkog generatora frekvencije 8 GHz izdvojenog križnim sprežnikom 6, te se prebacivao u frekvencijsko područje oko 70 MHz uz gubitke pretvorbe 6,5 dB. Međufrekvencijsko pojačalo s automatskom regulacijom pojačanja izvedeno je od pet stupnjeva s tranzistorima u spoju zajedničkog emitera. Ukupno pojačanje iznosilo je 70 dB, a automatska regulacija pojačanja omogućavala je svođenje ulazne dinamike signala od 50 dB u izlaznu dinamiku od ± 1 dB. Širina pojasa prijemnika u 3 dB točkama iznosila je 5 MHz [1].

Detektirani se signal pojačavao i oblikovao u izlaznom pojačalu (15), a unipolarni impulsi su se pretvarali u bipolarne u sklopu (16) kako bi se osiguralo da srednja

vrijednost izlaznog signala bude jednaka nuli. Time se sprječavalo da izlazni PCM ima srednju vrijednost različitu od 0 V (*DC offset*) i olakšavala se demodulacija. Ovo je bilo osobito značajno s obzirom da je kabel (telefonska parica) između RR uređaja i PCM uređaja mogao biti dug do 2 km [1, 2].

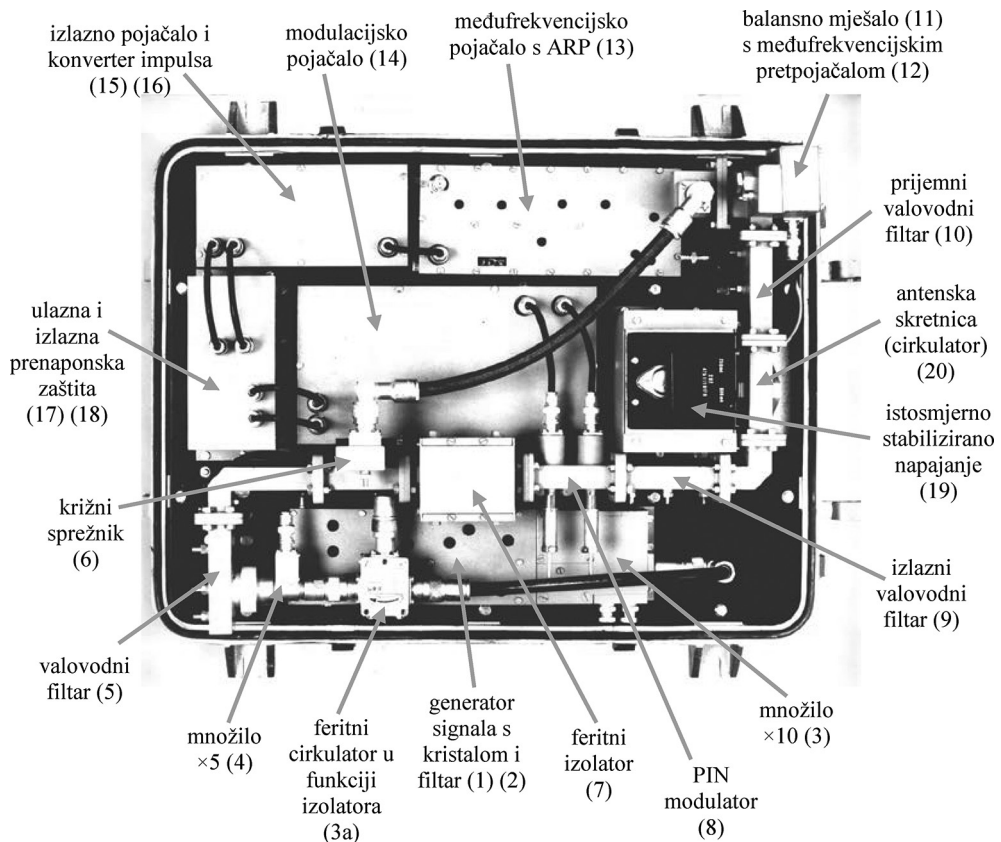


Sl. 5. RP8-24 u kutiji s otvorenim poklopcem [6]. Izlaz na antenu, konektori za mjerenje te PCM ulaz i izlaz nalazili su se s donje strane kutije u kojoj su sklopovi.

Napajanje sklopa osigurano je sklopom za napajanje (19) s dva stabilizatora za napone +12 V i –12 V. Istosmjerno napajanje dovodilo se do uređaja preko prijemne, odnosno odašiljačke parice. Kako se RR uređaj mogao postaviti na udaljenosti do 2 km od telefonskog multipleksa, od prenapona i munja zaštićen je prenaponskom zaštitom na ulazu (17) i izlazu (18).

Ukupni faktor šuma prijemnika prototipa uređaja RP8-24 bio je 13 dB [1]. Kasnijim unaprjeđenjem konstrukcije prijemnika ugradnjom niskošumnog tranzistorskog prepojačala pojačanja snage 28 dB izravno u sklop balansnog mješala faktor šuma smanjen je na 10 dB.

Svi opisani sklopovi primopredajnika osim feritnih cirkulatora u odašiljačkom dijelu i u antenskoj skretnici projektirani su, izrađeni, ispitani i ugođeni u laboratorijima u RIZ-u i u Zavodu za visokofrekventnu tehniku na ETF-u. Feritni cirkulatori nabavljani su od tvrtke SIAM iz Italije, a *step-recovery* diode i diode u mješalu iz SAD (Hewlett-Packard, odnosno Alpha Industries).



Sl. 6. RP8-24 u kutiji bez poklopca [6]. Generator signala nalazi se u donjem dijelu, modulacijsko pojačalo je u sredini, stabilizirano napajanje u sredini desno, a prijemni lanac u gornjem dijelu.

Uređaj se nalazio u vodonepropusnoj kutiji od lijevanog aluminija dimenzija $0,55 \text{ m} \times 0,41 \text{ m} \times 0,19 \text{ m}$, a težina bez antene iznosila je 27 kg [2]. Na valovodni izlaz uređaja (nalazi se na donjoj strani kutije na sl. 5 i 6) izravno se priključivala antena s paraboličnim reflektorom promjera 1,2 m te se takva cjelina zajedno ugrađivala na antenski stup ili prikladno postolje (sl. 7). Prihvat je omogućavao precizno podešavanje azimuta i elevacije uz pomoć vijaka. Uređaj se moglo ispitati i bez otvaranja kutije preko vanjskog konektora. Otvaranjem poklopca kutije svi su dijelovi bili dostupni za ugađanje, popravak ili zamjenu bez skidanja cijelog uređaja sa stupa (sl. 5, 6). Za veće domete predviđena je uporaba antena promjera 2 m i 3 m [1, 2].

Proizvodna inačica uređaja (oko 1974. godine) bez poklopca prikazana je na sl. 6. Na istoj su slici označeni i sastavni dijelovi u skladu s oznakama s blok sheme na sl. 2.

Tijekom proizvodnje uređaj je kontinuirano unaprjeđivan i usavršavan. Najznačajnija unaprjeđenja uređaja bila su: 1) smanjenje faktora šuma prijarnika, 2) poboljš-

šana temperaturna stabilnost množila frekvencije $\times 5$ sa SRD i 3) smanjenje faktora množenja frekvencije na četiri puta u pobudnom lancu odašiljača primjenom kristalnog oscilatora na frekvenciji 39 MHz.

Izvedba uređaja zahtijevala je usvajanje tehnike proizvodnje valovoda, zavarivanja prirubnica, izradbe valovodnih filtara, posrebrivanja, itd. Uređaji su podvrgavani detaljnom ispitivanju u klima-komori u širokom rasponu temperatura i vlažnosti okoline [5].

3. Radiorelejni uređaj RP8-24 u primjeni

Ukupno je u RIZ-u proizvedeno oko 30-ak uređaja RP8-24. Prva ostvarena radiorelejna veza primjenom uređaja RP8 bila je Babino polje (Mljet) – Dubrovnik ukupne duljine trase 32 km. Zbog konfiguracije terena veza je ostvarena primjenom dodatnog pasivnog reflektora na brdu iznad Babina polja. U studenome 1974. godine prototipni uređaji zamijenjeni su novim parom.

Za potrebe poduzeća Elektroprivreda, uređaji RP8-24 postavljeni su na trasama Matulji – Pehlin – Sv. Katarina, zatim na trasi HE Senj – Senj, te na trasama sinkrone mreže Međurić – Psunj – Lončarski vis – Osijek – Đakovo. Tim su uređajima bežično povezana i dva dalmatinska otoka, Korčula i Lastovo, trasom Vela Luka – Lastovo.

Izvan Hrvatske, uređaji su uporabljeni u Makedoniji na trasi Skopje – Vodno te u Crnoj Gori.

Slika 7 prikazuje ugađanje radiorelejne veze na lokaciji u unutrašnjosti Istre 1972. godine, a slika 8 tipičnu konfiguraciju s dva uređaja RP8 postavljena leđa-uz-leđa. Kod konfiguracija leđa-uz-leđa kojima su se premošćivale udaljenost veće od 50 km ili one gdje konfiguracija terena nije omogućavala izravnu optičku vidljivost, digitalni se signal demodulirao i demultipleksirao do osnovnog pojasa, te ponovno multipleksirao i modulirao prije odašiljanja na sljedećem odsječku trase.

Uređaj RP8-24 se u primjeni pokazao kao pouzdan i jednostavan za održavanje. Međutim preporuka koji se donio CCIR je kao normu predviđala radiorelejni uređaj koji bi imao 32 umjesto 24 kanala. Uređaj RP8 mogao se uz minimalne izmjene (ugađanje frekvencija lokalnih oscilatora, povećanjem širine pojasa međufrekvencije i sl.) prilagoditi novoj normi. Međutim, političkom je odlukom proizvodnja ugašena. Preostali uređaji i proizvedene komponente rabljeni su kao rezervni dijelovi za postojeće uređaje u uporabi, a kasnije su otpisani i uništeni. Krajem 90-ih godina 20. stoljeća postojala su dva kompletna prototipa uređaja RP8-24 u labora-



SI. 7. Ugađanje radiorelejne veze na lokaciju u unutrašnjosti Istre, 1972. godine, na slici je Juraj Bartolić, tada zaposlen kao inženjer – samostalni konstruktor u RIZ-u [5]



SI. 8. Tipična konfiguraciju s dva uređaja RP8 postavljena leđa-uz-leđa [6]

toriju Zavoda za radiokomunikacije i visokofrekvencijsku elektroniku Fakulteta elektrotehnike i računarstva (FER) u Zagrebu. Kako se nisu rabili, rastavljeni su u dijelove koji se i danas povremeno rabe na laboratorijskim vježbama za studente.

4. Zaključak

Radiorelejni uređaj RP8-24 za svoje je vrijeme predstavljao vrhunsko tehničko rješenje koje je Hrvatsku i RIZ svrstalo u sam vrh među proizvođačima telekomunikacijske opreme u Europi. Samo još jedan ili dva proizvođača (npr. Telettra) imali su u ponudi sličan uređaj. Postignuće je još i veće imajući u vidu tadašnje društveno uređenje u kojem je svaka komunikacija sa zapadnim zemljama smatrana potencijalno sumnjivom i u kojem je dostupnost inozemne (zapadne) stručne i znanstvene literature te mikrovalnih poluvodičkih komponenata bila ograničena.

Prekidom proizvodnje i rasformiranjem razvojne skupine, a kasnije i propadanjem cijelog RIZ-a uništena je tehnička jezgra koja je mogla imati svoju uspješnu budućnost. Ovaj je rad tek mali doprinos da se jedan značajan tehnološki iskorak u hrvatskom inženjerstvu ne zaboravi i da se ljudima koji su u njemu sudjelovali oda priznanje.

5. Zahvala

Hvala svima koji su nesebično svojim prilozima i sjećanjima pomogli pri pisanju ovog rada. Iznesene činjenice i tvrdnje osnivaju se na dostupnoj literaturi te sjećanjima sudionika i suvremenika. Zbog protoka vremena moguće su nenamjerne pogreške. Stoga će autori biti zahvalni svima koji će na njih ukazati.

Literatura

- [1] Radić, Z., Kviz, B., Kuštović, t., Koren, Z., Plavčić, Ž., Zimmerman, B., Brenko, Z., Renjić, P.: Mikrovalni primopredajni uređaj za prijenos 24 PCM telefonska kanala – RP8-24, *Elektrotehnika*, Vol. XI (1968), Br. 1, str. 5-12
- [2] *Radiorelejni uređaj RP8-24 za prijenos 24 PCM kanala u J-pojasu (7782-7900 MHz)*, Radioindustrija Zagreb (RIZ) Zagreb, (1974.)
- [3] Ruhek, A.: Multipleksni PCM transmisioni uređaj VM PCM 12, *Elektrotehnika*, Vol. XI (1968.), Br. 1, str. 13-22
- [4] Kviz, B., *privatna komunikacija*
- [5] Bartolić, J., *privatna komunikacija i zbirka fotografija*
- [6] Janković, D., *privatna zbirka fotografija*