

## LABORATORINIS MODULIS Nr. 1

### PUSLAIDININKINIŲ DIODŲ IR STABILITRONŲ TYRIMAS

#### 1. DARBO TIKSLAI

- lygintuvinio puslaidininkinio diodo *voltamperinės charakteristikos* (VACH) tyrimas;
- stabilitrono VACH tyrimas;
- lygintuvinio puslaidininkio darbo tyrimas.

#### 2. TEORINĖ DALIS

- lygintuvinių ir specialių puslaidininkinių diodų sandara, paskirtis ir pagrindinės charakteristikos [1, 2, 3];
- puslaidininkinių prietaisų VACH [1, 2, 3];
- puslaidininkinių diodų įjungimo schemas [1, 3];
- lygintuvinių diodų schemų principai ir veikimo ypatumai [1].

Puslaidininkinis diodas yra dviejų elektrodų puslaidininkinis prietaisas, turintis vieną  $p-n$  sandūrą.

Visus puslaidininkinius diodus galima suskirstyti į dvi grupes: lygintuvinius ir specialiuosius. Lygintuviniai diodai skirti kintamajai srovei lyginti. Atsižvelgiant į lyginamosios srovės dažnį ir formą jie skirstomi į žemo dažnio, aukšto dažnio ir impulsinius. Specialiems puslaidininkiniams diodams būdingos įvairios  $p-n$  sandūrų savybės, pvz.: pramušimo reiškinys, fotoefektas, VACH sričių, turinčių neigiamą varžą, egzistavimas ir kt. Specialieji diodai naudojami nuolatinei įtampai stabilizuoti, optiniam spinduliavimui registruoti, elektriniams signalams formuoti ir t. t.

#### *Lygintuviniai diodai*

Lygintuviniai puslaidininkiniai diodai dažniausiai gaminami iš silicio, germanio ar galio arsenido. Klasifikuoti šiuos diodus galima pagal konstrukciją ir gamybos technologiją. Pagal konstrukciją ly-

lydintuviniai diodai skirstomi į plokštinius ir taškinius, o pagal gamybos technologiją – į lydytinius, difuzinius ir epitaksinius.

Plokštiniai diodai, turintys didelį  $p-n$  sandūros plotą, naudojami didelėms srovėms (iki 30 A) lyginti; o taškiniai diodai, turintys mažą  $p-n$  sandūros plotą, – mažoms srovėms (iki 30 mA) lyginti.

Paprastai lygintuvinis puslaidininkinis diodas normaliai dirba iki 1000 V įtampos. Prireikus padidinti lyginamąją įtampą, naudojami lyginimo stulpai, kuriuos sudaro iš eilės nuosekliai sujungti puslaidininkiniai diodai – tai leidžia įtampą padidinti iki 15000 V.

Didelėms srovėms lyginti skirti lygintuviniai didelio galingumo diodai, vadinami jėginiais. Jie leidžia lyginti sroves iki 30 A. Tokie diodai dažniausiai gaminami iš silicio ar galio arsenido, nes germaniui būdinga didesnė atbulinės srovės per  $p-n$  sandūrą priklausomybė nuo temperatūros.

Lydinių diodai dažniausiai naudojami kintamajai srovei iki 5 kHz dažnio lyginti. Difuziniai silicio diodai gali dirbti ir padidinto dažnio, iki 100 kHz, zonoje. Epitaksiniai silicio diodai su metalo sluoksniu (su Šotkio barjeru) naudojami kaip aukšto dažnio (iki 500 kHz) diodai. Geriausios dažnio charakteristikos būdingos galio arsenido lygintuviniams diodams, dirbantiems dažnio iki kelių megahercų diapazonu.

Pagrindinės puslaidininkinių diodų charakteristikos gaunamos analizuojant jų VACH. Reikia atkreipti dėmesį į tai, kad srovės  $I$  per  $p-n$  sandūrą priklausomybė nuo įtampos  $U$  kritimo sandūroje išreiškiama Eberso ir Molo lygtimi:

$$I = I_s(e^{U/\varphi_T} - 1), \quad (1.1)$$

kur  $I_s$  – atbulinė diodo prisotinimo srovė, o  $\varphi_T$  – šilumos potencialas.

Kadangi puslaidininkiams, kai  $T = 300 \text{ K}$ , šilumos potencialas  $\varphi_T = 25 \text{ mV}$ , jau esant įtampai  $U = 0,1 \text{ V}$  galima naudotis supaprastinta formule:

$$I = I_s e^{U/\varphi_T}. \quad (1.2)$$

Svarbus diodo charakteristikos parametras yra diferencialinė  $p$ - $n$  sandūros varža, lygi įtampos kritimo ant diodo ir srovės per diodą pokyčių santykiui:

$$r_{dIF} = \frac{dU}{dI}. \quad (1.3)$$

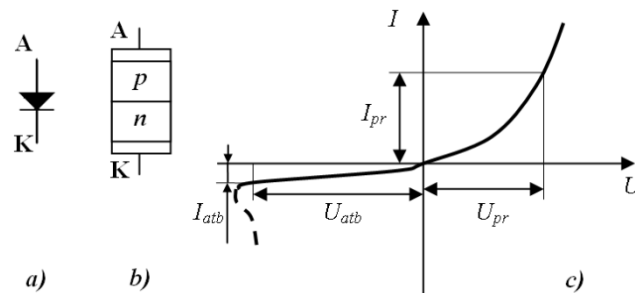
Naudojant (1.2) ir (1.3), diferencialinę varžą galima apskaičiuoti tiksliau:

$$\frac{1}{r_{dIF}} = \frac{dI}{dU} = \frac{1}{r_{dIF}} (I + I_p). \quad (1.4)$$

Tekant srovei (atsižvelgiant į diodo tipą srovė gali būti nuo vienetų miliamperų iki dešimčių amperų) per  $p$ - $n$  sandūrą, puslaidininkio tūryje krenta įtampa, kurios negalima ignoruoti. Šiuo atveju Eberso ir Molo lygtis atrodo taip:

$$I = I_p e^{(U - U_{pr})/rT}, \quad (1.5)$$

kur  $R$  – viso puslaidininkinio kristalo varža, vadinamoji nuosekioji varža.

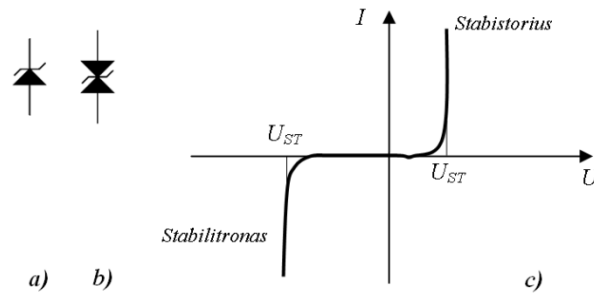


1.1 pav. Puslaidininkinio diodo grafinis žymėjimas (a), struktūra (b) ir statinė voltamperinė charakteristika (c)

1.1 a pav. parodytas grafinis puslaidininkinio diodo žymėjimas elektrinėse schemose, 1.1 b pav. – jo struktūra. Diodo elektrodas, prijungtas prie  $p$  srities, vadinamas anodu, o elektrodas, prijungtas prie  $n$  srities, – katodu. Statinė VACH parodyta 1.1 c pav.

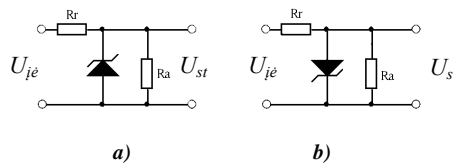
### Stabilitronas

Stabilitronas – tai puslaidininkinis diodas, kurio  $p-n$  sandūra dirba griūtinio pramušimo režimu. Toks režimas gaunamas prijungus  $p-n$  sandūrą atbuline kryptimi. Dirbant griūtinio pramušimo režimu, srovė kinta plačiu diapazonu, o įtampos kritimas ant diodo lieka praktiškai nepakitęs. 1.2 a, b pav. parodyta stabilitrono grafinis žymėjimas, o 1.2 c pav. – tipinė VACH.



1.2 pav. Stabilitrono (a – vienpusio, b – dvipusio) ir VACH (c:  $U_{ST}$  – stabilizacijos įtampa) grafinis žymėjimas

Tipinio mažo galingumo silicio stabilitrono griūtinė srovė lygi maždaug 10 mA, todėl srovei per stabilitroną apriboti nuosekliai su juo įjungiami ribojamoji varža  $R_r$  (1.3 a pav.). Jei griūtinė srovė tokia, kad galingumas, išsklaidomas stabilitrone, neviršija leistino dydžio, tai tokiu režimu prietaisas gali dirbti neribotai ilgai. Daugumai stabilitronų ribinė leistina išsklaidomo galingumo norma yra nuo 100 mW iki 10 W.



1.3 pav. Stabilitrono (a) ir stabistorio (b) jungimo schema:  
 $R_r$  – ribojamoji varža,  $U_{ie}$  – įėjimo įtampa,  $R_a$  – apkrovos varža

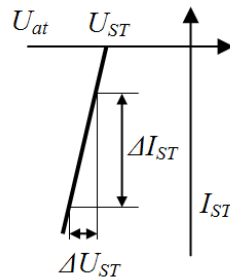
Kai kada įtampai stabilizuoti naudojamas reiškinys, kai tiesioginis įtampos kritimas diode nedaug priklauso nuo tekančios per  $p-n$  sandūrą srovės stiprio. Prietaisai, kuriuose naudojamos šis efektas, vadinami stabistoriais. Įtampos kritimas  $p-n$  sandūroje tiesiogine kryptimi dažniausiai sudaro nuo 0,7 iki 2 V, todėl stabistoriai leidžia stabilizuoti tik mažas įtampas (ne daugiau kaip 2 V).

Srovei apriboti per stabistorių nuosekliai su juo įjungžiama varža  $R_f$  (1.3 b pav.).

Diferencinė stabilitrono varža – tai parametras, charakterizuojantis jo VACH nuolydį pramušimo zonoje:

$$r_{df} = \frac{\Delta U_{ST}}{\Delta I_{ST}} \quad (1.6)$$

1.4 pav. parodyta tiesinė stabilitrono VACH atkarpa, nustatanti prietaiso diferencinę varžą.



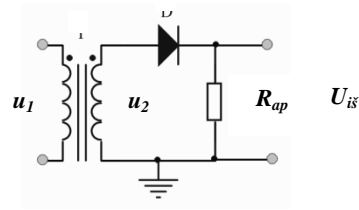
1.4 pav. Linearizuota stabilitrono charakteristika

#### Puslaidininkiniai lygintuvai

Lygintuvu vadinamas įtaisas, skirtas kintamajai srovei paversti nuolatine. Pagrindinė lygintuvų paskirtis – išlaikyti apkrovimo srovės kryptį kintant įtampos poliškumui. Sukurta daug puslaidininkinių lygintuvų schemų, besiskiriančių diodų kiekiu ir jų jungimu. Toliau išnagrinėtos kai kurios iš tų schemų.

1.5 pav. parodyta vienfazio vieno pusperiodžio lygintuvo schema, kur  $T$  – yra transformatorius,  $R_{ap}$  – apkrovos varža,  $u_1$  ir  $u_2$  – pir-

minės ir antrinės transformatoriaus apvijų įtampos amplitudė ir  $U_m$



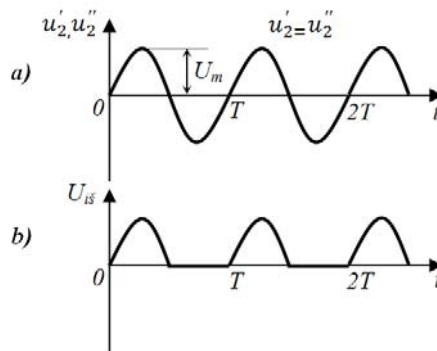
1.5 pav. Vienfazio vieno pusperiodžio lygintuvo schema

– išėjimo įtampa.

Vienfazis vieno pusperiodžio lygintuvas praleidžia tik vieną maitinančiosios įtampos pusperiodį (1.6 pav.). Išlygintos įtampos vidutinė vertė lygintuvo išėjime skaičiuojama pagal formulę:

$$U_{is} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_m \sin \omega t dt = \frac{U_m}{\pi}, \quad (1.7)$$

kur  $U_m$  – antrinės transformatoriaus apvijų įtampos amplitudė,  $T$  –



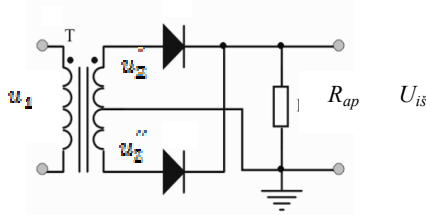
1.6 pav. Įtampos formos vienfazių pusperiodžių lygintuvo įėjime (a) ir išėjime (b)

įėjimo įtampos periodas;  $\omega$  – kampinis signalo dažnis,  $\omega = 2\pi/T$ .

Lygintuvo išėjimo įtampos pulsacijų periodas yra lygus įėjimo įtampos periodui. Maksimali atbulinė diodo įtampa yra lygi didžiausiai įėjimo įtampai:

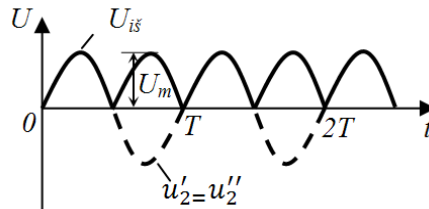
$$U_{max} = U_m \quad (1.8)$$

1.7 pav. parodyta dvifazio dviejų pusperiodžių lygintuvo schema.



1.7 pav. Dvifazio dviejų pusperiodžių lygintuvo schema

Iš esmės mes čia turime du lygiagrečiai sujungtus vienfazius lygintuvus, kurie maitinami nuo dviejų antrinės transformatoriaus apvijos pusių. Tokiu būdu sukuriama du priešingų fazių maitinimo lygintuvai, turintys vieną tą pačią apkrovą. Įtampos forma tokio lygintuvo išėjime parodyta 1.8 pav.



1.8 pav. Įtampos formos dvifazio dviejų pusperiodžių lygintuvo įėjime ir išėjime

Dvifaziam dviejų pusperiodžių (dvipusiam) lygintuvui būdingas geras transformatoriaus išnaudojimas. Išlygintos įtampos vidutinė vertė lygintuvo išėjime skaičiuojama pagal formulę:

$$U_{is} = \frac{2U_m}{\pi} \quad (1.9)$$

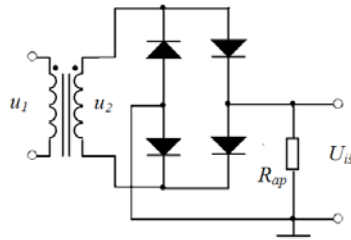
Dvipusio lygintuvo išėjimo signalo periodas du kartus trumpesnis negu vienpusio. Maksimali atbulinė kiekvieno diodo įtampa lygi didžiausios įtampos antrinėje apvijoje (įtampų dviejose apvijos pusėse sumai  $U_2 = U_2' + U_2''$ ) ir tiesioginio įtampos kritimo diode  $U_{kv}$  skirtumui:

$$U_{max} = U_m - U_{kr} \quad (1.10)$$

Praktiškai dažniausiai naudojamas vienfazis dviejų pusperiodžių tiltinis lygintuvas, kurio schema parodyta 1.9 pav.

Įtampos formos tiltinio lygintuvo įėjime ir išėjime, taip pat vidutinis išėjimo įtampos dydis  $U_{i\bar{}}$  tokie pat kaip ir dvifazio dviejų pusperiodžių lygintuvo. Didžiausia atbulinė įtampa  $U_{max}$  tiltiniame lygintuve lygi transformatoriaus antrinės apvijos įtampai.

Tiltinis lygintuvas, skirtingai nei dvifazis dviejų pusperiodžių lygintuvas, gali dirbti be transformatoriaus. Tiltinės schemos trūkumas – reikia dvigubo lygintuvinių diodų kiekio.



1.9 pav. Vienfazio dviejų pusperiodžio tiltinio lygintuvo schema

### 3. LABORATORINIO STENDO APRAŠYMAS

Laboratorinį stendą sudaro:

- bazinis laboratorinis stendas;
- laboratorinis modulis **Lab1A**, skirtas lygintuviniam diodui 1N4148 VACH ir stabilitronui 1N4736A tyrinėti.

### 4. DARBO UŽDUOTYS

Redaktoriumi *MS Word* paruoškite ataskaitos šabloną. Sumontuokite modulį **Lab1A** ant maketinės laboratorinės stoties *NI ELVIS II* plokštės. Išorinis modulio vaizdas parodytas 1.10 pav.

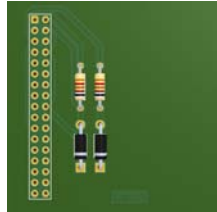
Paleiskite programą **Lab-1.vi**.

Susipažinę su darbo tikslais nuspauskite mygtuką „**Pradėti darbą**“. Ekране atsiras 1 užduoties virtualiojo prietaiso (VP) vaizdas (1.12 pav.).

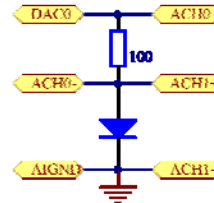


*Pastaba:* čia ir toliau elektrinėse jungimo schemose naudojami tokie žymėjimai:

1. **DAC0** – analoginis išėjimas 0;
2. **ACH3+** – **A**nalog **C**hannel 3+ – analoginis įėjimas 3, poliškumas +;
3. **AIGND** – **A**nalog **I**nput **G**round – analoginė žemė;
4. **DI2** – **D**igital **I**nput 2 – skaitmeninis įėjimas – išvadas 2;
5. **GROUND** – skaitmeninė žemė;
6. **+5 V, +15 V, -15 V** – maitinimo šaltinių įjungimas.



1.10 pav. Išorinis diodo ir stabilitrono charakteristikų tyrimo modulio Lab1A vaizdas



1.11 pav. Elektrinė jungimo schema, skirta lygintuvinio diodo VCh tirti

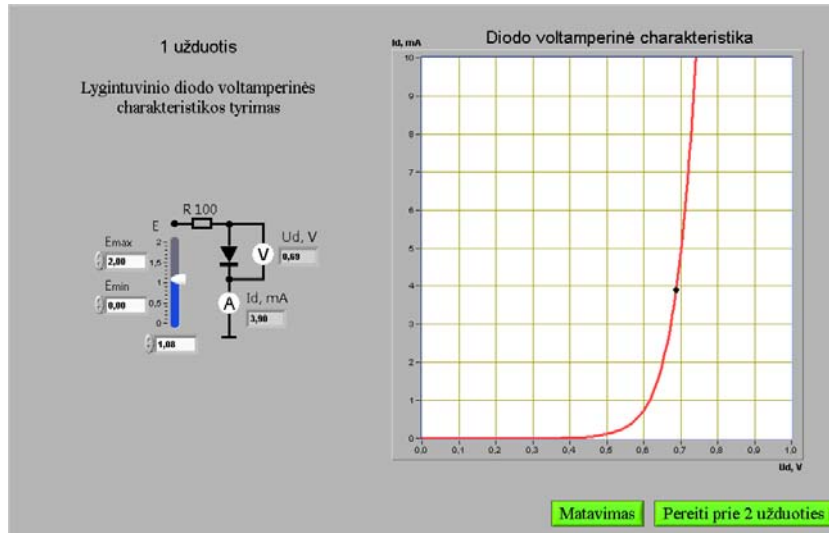
### 1 užduotis. Lygintuvinio diodo voltamperinės charakteristikos tyrimas

VCh tyrinėti naudojama elektrinė jungimo schema, parodyta 1.11 pav.

**4.1.1.** Sukurkite lygintuvinio diodo VCh tiesiąją atšaką. Tam tikslui VP valdymo elementais  $E_{min}$  ir  $E_{max}$  nustatykite įtampos kitimo diapazoną šaltinio  $E$  išėjime (rekomenduojamos ribos nuo 0 iki +2 V), po to VP valdymo lange nuspauskite mygtuką „Matavimas“. Grafiniame indikatoriuje VP atsiras lygintuvinio puslaidininkinio diodo VCh.

**4.1.2.** Nukopijuokite gautą VCh į keitimo buferį, tam tikslui paspauskite dešinę pelės mygtuką indikatoriaus vaizde ir išrinkite iš kontekstinio meniu komandą „Copy Data“. Pereikite į redaktorių MS Word, įterpkite indikatoriaus vaizdą iš keitimo buferio į atskaitos puslapį.

**4.1.3.** Panaudodami VACH, nustatykite statinę ir diferencinę puslaidininkinio diodo varžas. Tam tikslui, slankiojančiu reguliatoriumi keisdami įtampą šaltinio  $E$  išėjime, nustatykite iš pradžių srovę per diodą apie 5 mA, o po to maždaug 6 mA. Į ataskaitą užrašykite



1.12 pav. 1 užduoties VP vaizdas

ampermetro  $I_d$  ir voltmetro  $U_d$  parodymus tiems diodo VACH taškams.

Remdamiesi gautais duomenimis apskaičiuokite statinę diodo varžą nurodytuose taškuose pagal formulę  $R_{sc} = U_{kv}/I_{kv}$  ir diferencinę varžą pagal formulę  $r_{dif} = \Delta U/\Delta I$ . Palyginkite gautus duomenis su žinyno duomenimis. Rezultatus užrašykite į ataskaitą.

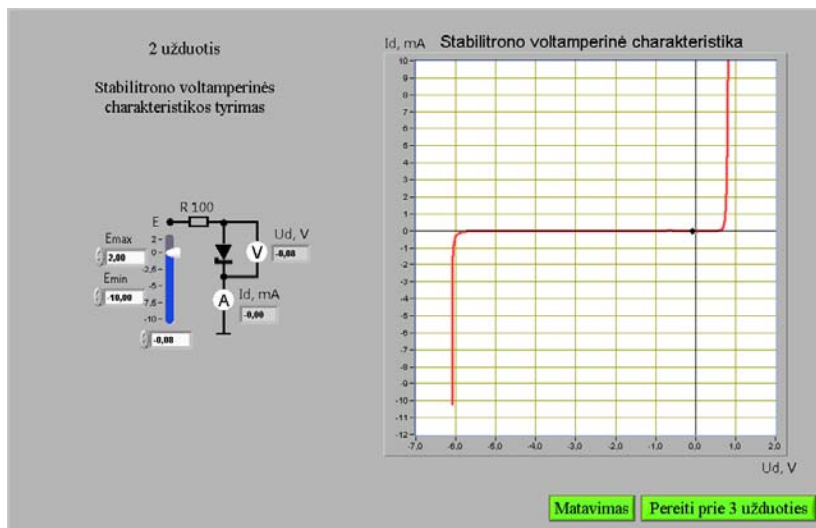
**4.1.4.** Pakartokite tyrinėjimus, nurodytus 4.1.3 punkte VACH taškams, nustatę srovę per diodą 0,5 mA ir 1 mA.

**4.1.5.** Pagal diodo VACH nustatykite lanksto įtampą. Lanksto įtampa nustatoma pagal tiesią charakteristikos atkarpą taškui, kur diodo charakteristika staigiai pereina į laužtinę. Palyginkite gautą dydį su žinyno duomenimis. Rezultatus užrašykite į ataskaitą.

**4.1.6.** Nuspauskite priekiniame valdymo lange mygtuką „Pereiti prie 2 užduoties“, ekrane atsiras 2 užduoties VP valdymo langas (1.13 pav.).

## 2 užduotis. Stabilitrone voltamperinės charakteristikos tyrimas

Stabilitronui VACH tyrinėti naudojama elektrinė schema, parodyta 1.14 pav.



1.13 pav. 2 užduoties VP vaizdas

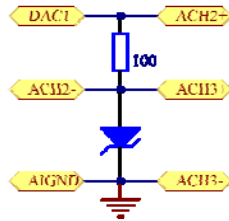
**4.2.1.** Sudarykite stabilitrone VACH. Tam tikslui (1.13 pav.) valdymo elementais VP  $E_{min}$  ir  $E_{max}$  pasirinkite įtampos kitimo diapazoną šaltinio  $E$  išėjime (rekomenduojamos ribos nuo  $-10$  V iki  $+2$  V) ir nuspauskite VP valdymo lange mygtuką „Matavimas“. VP atliks daugybę matavimų ir jo grafiniame indikatoriuje atsiras stabilitrone VACH grafikas.

**4.2.2.** Nukopijuokite gautą VACH į keitimo buferį, o po to įterpkite indikatoriaus vaizdą iš keitimo buferio į ataskaitos puslapį.

**4.2.3.** Pagal gautą VACH nustatykite stabilizacijos įtampą, kuri atitinka srovę per stabilitroną  $I_{st} = -9$  mA. Palyginkite gautą rezultatą su žinyno duomenimis. Rezultatus užrašykite į ataskaitą.

**4.2.4.** Pagal stabilitrone VACH nustatykite jo diferencinę varžą. Tam tikslui, slankiojančiu reguliatoriumi keisdami įtampą šaltinio  $E$  išėjime, nustatykite srovę per stabilitroną apie  $-5$  mA, o po to apie

9 mA. Užrašykite į ataskaitą ampermetro  $I_d$  ir voltmetro  $U_d$  parodymus šioms srovės reikšmėms, nustatykite įtampą šaltinio  $E$  išėjime ir įtampos kritimą stabilitrone  $U_{st}$ . Apskaičiuokite diferencinę



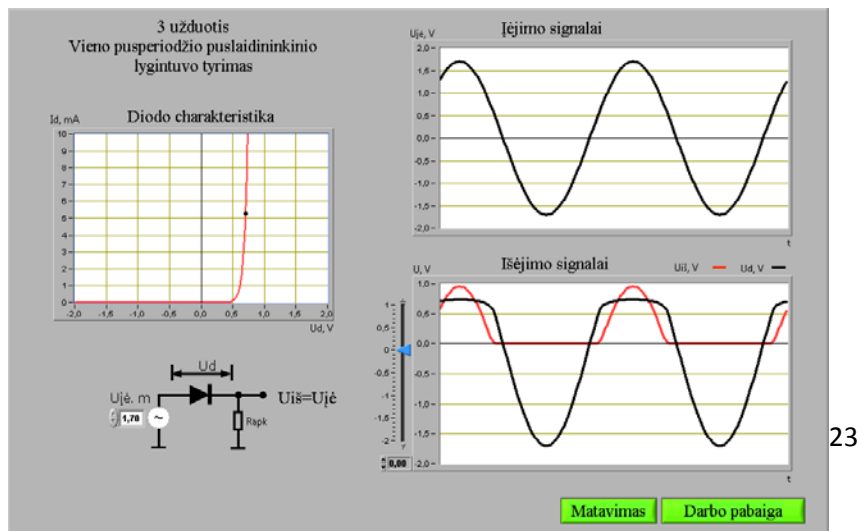
1.14 pav. Elektrinė jungimo schema, skirta stabilitronui VACH tirti

stabilitrono varžą  $r_{dif} = \Delta U / \Delta I$  ir stabilizacijos koeficientą  $k_{st} = \Delta U_{is} / \Delta U_{st}$ . Gautus rezultatus palyginkite su žinyno duomenimis. Skaičiavimų rezultatus įrašykite į ataskaitą.

4.2.5. Priekiniame VP valdymo lange nuspauskite mygtuką „Per-eiti prie 3 užduoties“, ekrane atsiras 3 užduoties VP valdymo langas (1.15 pav.).

### 3 užduotis. Vieno pusperiodžio puslaidininkinio lygintuvo tyrimas

Atliekant vieno pusperiodžio puslaidininkinio lygintuvo darbo tyrimą naudojama elektrinė schema, parodyta 1.12 pav. Skiriasi tik tuo, kad VP paduoda į schemos įėjimą ne nuolatinį, bet harmoninį



1.15 pav. 3 užduoties VP vaizdas

virpesį (1.15 pav.).

**4.3.1.** Nuimkite lygintuvo įėjimo ir išėjimo įtampos oscilogramas. Tam tikslui, panaudodami valdymo elementą  $U_{2m}$ , nustatykite įėjimo signalo amplitudę  $U_{\text{į}}$ , apytikriai lygią 2 V, po to nuspauskite priekinio VP valdymo lango mygtuką „**Matavimas**“. Grafiniai VP indikatoriai parodys lygintuvo schemos įėjimo ir išėjimo signalų oscilogramas.

**4.3.2.** Nukopijuokite gautas oscilogramas į ataskaitos puslapį.

**4.3.3.** Išmatuokite ir užrašykite į ataskaitą maksimalią įtampą lygintuvo išėjime  $U_{\text{išmax}}$ . Tam tikslui panaudokite vizyro liniją, kurios padėtis keičiama slankiojančiu reguliatoriumi, esančiu priekiniame VP valdymo lange, ir skaitmeninį indikatorių, rodantį įtampos lygį (1.15 pav.).

**4.3.4.** Apskaičiuokite ir įrašykite į ataskaitą vidutinį išlygintos įtampos dydį lygintuvo išėjime. Skaičiuokite pagal formulę  $U_{\text{vid.lyg.}} = U_{\text{išmax}}/\pi$ .

**4.3.5.** Panaudodami gautas oscilogramas, palyginkite signalų kintimo periodus lygintuvo įėjime ir išėjime ir išmatuokite didžiausią atbulinę diodo įtampą. Išvadas ir rezultatus užrašykite į ataskaitą.

**4.3.6.** Išjunkite VP, paspausdami priekiniame valdymo lange mygtuką „**Darbo pabaiga**“.

## 5. KONTROLINIAI KLAUSIMAI

- Koks elektroninis prietaisas vadinamas puslaidininkiniu diodu?
- Palyginkite srovės, tekančias per lygintuvinį puslaidininkinį diodą, esant tiesioginiam ir atbuliniam dydžių priešįtampai. Paašškinkite skirtumą.
- Kas yra diodo srovės prisotinimas?
- Kam naudojami stabilitronai?
- Kuri stabilitrono VACH atšaka yra darbinė?
- Kaip nustatomas stabilizacijos koeficientas?
- Ar galima panaudoti stabilitroną kintamosios srovės lygintuvų schemose?

- Ar stabilitronus galima įjungti nuosekliai? Lygiagrečiai? Kokias tokiu būdu galime nustatyti papildomas savybes?
- Kokie yra stabilitrono parametrų terminės kompensacijos būdai?
- Kuo skiriasi išėjimo įtampa vieno pusperiodžio ir dviejų pusperiodžių lygintuvuose?
- Palyginkite didžiausią atbulinę įtampą vieno pusperiodžio ir dviejų pusperiodžių dioduose?
- Ar vienodi dviejų pusperiodžių lygintuvo įėjimo ir išėjimo įtampos dažniai?
- Kokiai lygintuvo schemai būdinga mažiausia pulsacijos amplitudė išėjime?
- Kaip tiksliai darbo metu nustatomi puslaidininkinių prietaisų parametrai? Nuo ko šiuo atveju gali priklausyti gautų rezultatų kokybė?