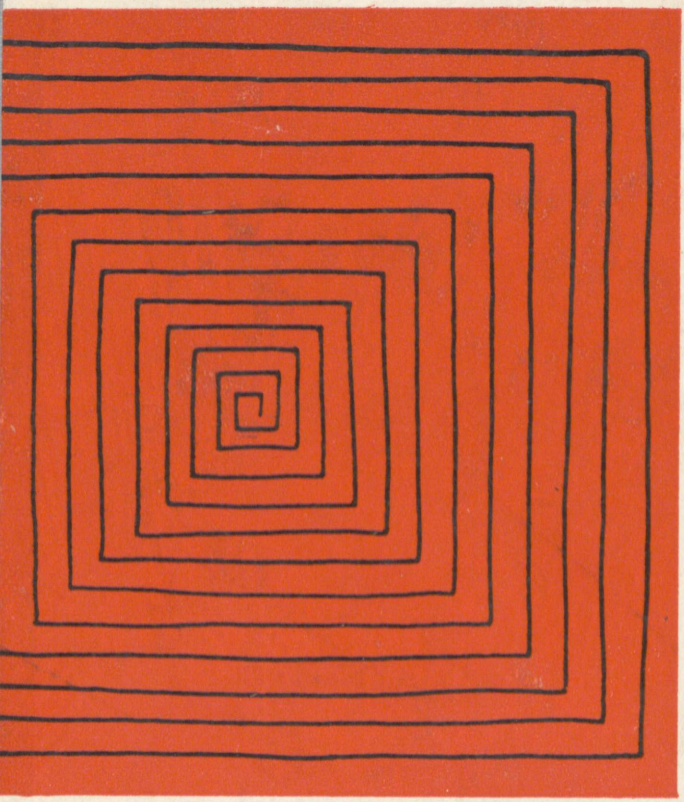
A. KOORT



elektroonika-aparatuuri

töökindlus

A. KOORT

ELEKTROONIKA-APARATUURI TÖÖKINDLUS

KIRJASTUS „VALGUS"
TALLINN 1967

6T2. 15
K66

УДК 621.38.019.3

Kunstiliselt kujundanud *J. Arrak*

Raamatus käsitletakse lühidalt elektroonikaaparatuuri töökindluse põhilisi probleeme. Vaadeldakse töökindlusparameetreid, tutvustatakse nende parameetrite insenerliku arvutuse ja eksperimentaalse määramise meetodeid, aga samuti abinõusid töökindluse tagamiseks ja suurendamiseks. Analüüsitakse elektronmõõteriistade töökindluse ja mõõtetäpsuse vahelisi seoseid. Tuuakse andmeid raadiotehniliste elementide töökindlusparameetrite kohta.

Raamat on mõeldud inseneridele ja tehnikutele, kes tegelevad elektroonikaaparatuuri konstrueerimise, tootmise ja kasutamisega, ning kõrgemate ja kesk-eriõppeasutuste vastava eriala üliõpilastele.

Retsenseerinud tehnikakandidaat *H. Sillamaa.*

Надежность электронной аппаратуры

А. Коорт
1967

В книге кратко излагаются основные проблемы надежности электронной аппаратуры. Рассматриваются параметры надежности и методы инженерного расчета и экспериментального определения этих параметров. Анализируются возможности для обеспечения и повышения надежности. Исследуется связь между надежностью и точностью электронной измерительной аппаратуры. Приводятся некоторые данные о параметрах надежности радиотехнических деталей.

Книга предназначена для инженеров и техников, занятых разработкой, производством и эксплуатацией электронной аппаратуры, а также для студентов высших и средних специальных учебных заведений соответствующей специальности.

2
Tartu Riikliku Ülikooli
Raamatukogu
71145

3-3-12
40-67

Eessõna

Tehnika arenguga on seadmete töökindlus muutunud kaasaja üheks aktuaalsemaks tehniliseks probleemiks. Seadmete töökindluse tagamiseta on tehniline progress võimatu. Inseneride ja teadlaste järjest suuremad jõupingutused on suunatud igat liiki tehniliste seadmete töökindluse tõstmisele.

Kasvavat huvi selle probleemi vastu näitab pidevalt suurenev töökindlusküsimustele pühendatud artiklite, monograafiate ja õpikute hulk nii kodu- kui ka välismaal. Neis teostes käsitletakse antud probleemi tehnilisest, matemaatilisest, organisatsioonilisest ja majanduslikust seisukohast.

Eesti keeles töökindlusalane kirjandus praktiliselt puudub, kui mitte arvestada üksikuid artikleid. Kuid viimasel ajal on Eesti NSV-s hoogustunud töökindlusalane tegevus, kusjuures töökindluse tõstmist mõistetakse kui ühte osa toodete kvaliteedi parandamisest. See asjaolu tingib tungiva vajaduse eestikeelse sellealase kirjanduse järele.

Käesolev raamat on mõeldud eeskätt elektroonikaaparatuuri konstrueerivate büroode ja tootvate tehaste inseneridele ning tehnikutele, kõrgemate tehniliste õppeasutuste üliõpilastele, aga samuti kõikidele spetsialistidele, kes tegelevad elektroonikaaparaatide konstrueerimise, valmistamise ja kasutamisega.

Raamatu kirjutamisel on eeldatud seda, et lugeja peab teadma diferentsiaal- ja integraalarvutuse aluseid ning tundma tõenäosusteooriat ja matemaatilist statistikat.

Töökindlusõpetuse kui teadusliku distsipliini tormilise, aga suhteliselt lühikese arengu tulemusena on kindlaks kujunenud selle distsipliini põhilised mõisted ja nendele mõistetele vastavad terminid. Eesti keeles on vastav terminoloogia kujunemisel. Loodetavasti aitab käesolev

raamat kaasa üldtunnustatud terminoloogia tekkimisele.

Autor avaldab tänu T. Söödile ja A. Rosenbergile, kes aitasid kaasa hinnaliste kriitiliste märkustega käsikirja kirjutamisel, ning E. Parvele, kelle toetuseta käesolev raamat poleks teoks saanud.

Autor tänab dotsent H. Sillamaad, kes võttis endale retsensendi vaevarikka ülesande.

Sissejuhatus

0. 1. Kvaliteet ja töökindlus

Elektroonikaaparatuuri töökindluse tagamine ja suurendamine on kaasajal muutunud üheks tähtsamaks tehniliseks probleemiks. Iga insener, kes tegeleb elektroonikaaparatuuri konstrueerimise, tootmise või kasutamisega, võib tuua palju näiteid selle kohta, millist tähelepanu pööratakse kogu maailmas küsimustele, mis on seotud töökindlusega. Suuri summasid kulutatakse teaduslikele uurimis- ja arendustöödele, mis võimaldavad suurendada konkreetse aparatuuri töökindlust. Tehastes rakendatakse samal eesmärgil uusi tehnoloogilisi protsesse, uusi seadmeid, uusi töö organiseerimise meetodeid. Pidevalt toimuvad töökindlusalased konverentsid; kasvab sellealaste raamatute ja artiklite arv.

Samal ajal tuleb tunnistada, et paljudel spetsialistidel pole kindlat ettekujutust töökindlusõpetusest, tema eesmärkidest, matemaatilistest ja eksperimentaalsetest meetoditest, mida ta kasutab, tema kohast teiste tehniliste distsipliinide seas, tema võimalustest.

Defineerime mõiste «töökindlus» täpsemalt hiljem ja vaatleme praegu neid põhjusi, mis tingisid töökindlusõpetuse tekkimise ja tormilise arengu. Seejuures tugineme me sellele enam või vähem täpsele töökindluse mõistele, mis lugejal on välja kujunenud. Loomulikult tekib küsimus, kas paarkümmend aastat tagasi, enne töökindlusõpetuse tekkimist, ei nõutud toodetelt, nende hulgas ka elektroonikaaparatuurilt, kindlat, tõrketut tööd. Miks kerkis see probleem esile alles viimase kahe aastakümne vältel?

Nõue, et aparatuur peab olema töökindel, et ta peab temale pandud funktsioone täitma teatud kindlates ekspluatatsioonitingimustes teatud kindla aja jooksul, olema hõlpsasti remonditav ja võimalikult pika elueaga,

oli niivõrd endastmõistetav, et seda ei peetud kuni viimase ajani vajalikuks fikseerida üheski tehnilises dokumendis. Kuid paari viimase aastakümne jooksul on elektroonikas toimunud suured muutused.

Elektroonikaaparatuuri kasutatakse järjest laialdasemalt. Meenutame selle rakendamist tööstuslike protsesside automatiseerimisel, sidetehnikas, transpordivahendite — lennukite, laevade, rongide — juhtimisel, raketi- ja kosmosetehnikas, tuletame meelde kas või raadiovastuvõtjate ning televiisorite arvu järsku suurenemist. Me ei too mingeid konkreetseid arve selle kasvu iseloomustamiseks, kuna need poleks täielikud ja vananevad isegi selle ajavahemiku kestel, mis eraldab raamatu ilmumist tema kirjutamisest. Töökindlam toode on rahvamajandusele odavam toode ja isegi mõni protsent ekspluatatsioonikulude vähenemist töökindluse suurendamise arvel moodustab miljarditeni ulatuva summa.

Elektroonikaaparatuur muutub pidevalt keerukamaks. Kõige lihtsamaks keerukuse näitajaks on aparatuuris kasutatavate raadiodetailide arv. Keskmine raadiovastuvõtja koosneb paarisajast detailist. Keerulisemate raadiomõõteriistde detailide arv ulatub mõne tuhandeni. Elektronarvutites loendatakse detaile kümnete ja sadade tuhandetega. Kuid ei tule unustada, et selliseid seadmeid nagu elektronarvutid võidakse kasutada ja kasutataksegi ühises süsteemis koos teist laadi, kuid niisama keeruliste seadmetega, näiteks raadiolokaatoriga. Ei ole vaja erilist fantaasiat, et ette kujutada, kui keeruline peab olema kosmoselaevade juhtimise süsteem. Kui iga transistori, elektronlambi, takisti või kondensaatori rivist väljalangemine tähendab ka kogu aparatuuri või terve süsteemi rivist väljalangemist, siis on instinktiivselt selge, milliseid tehnilisi raskusi kutsub esile töökindluse tagamine, kui aparatuur või süsteem sisaldab kümneid ja sadu tuhandeid detaile.

Elektroonikaaparatuuri funktsioonid on muutunud väga vastutusrikasteks. Kui lakkab töötamast televiisor, laboratooriumis kasutatav signaalgeneraator või ostsilloskoop, siis sellega tekitatud kahju suurus on, kui nii võiks öelda, igapäevasuse piirides ja moodustub väljavahetatud detailide hinnast ning remonttööde maksumusest. Kuid oletame, et elektroonikaaparatuuri kasutatakse keemiatehases mingi keerulise pideva protsessi juhtimi-

seks. Siis tähendab juhtimisaparatuuri rivist väljalangemine keemilise protsessi katkemist ja sellega seotud materjali, aja jne. kaotust. Sel juhul on tekitatud kahju kümneid ja sadu kordi suurem juhtimisaparatuuri maksumusest.

Lõpuks ei saa märkimata jätta asjaolu, et elektroonikaaparatuuri kasutamistingimused — ümbritseva õhu temperatuur, õhuniiskus, õhurõhk, mehaaniline vibratsioon, mehaaniliste löökide esinemise võimalus jne. — ei ole enam need, mis nad olid mõned aastakümned tagasi. Välitingimustes töötamiseks määratud aparatuurilt nõutakse funktsioneerimist nii +50° C kui ka —50° C juures. Lennukite pardaaparatuur peab vastu pidama suurtele kiirendustele, näiteks pidevalt mõjuv lineaarne kiirendus võib moodustada kuni 12 g ($g = 9{,}8\,\frac{m}{s^2}$). Elektroonika-aparatuuri kasutamine äärmiselt rasketes välistes tingimustes ja sellega kaasnev suurenenud tõrgete arv oli üheks põhjuseks, mis andis tõuke töökindlusõpetuse arenguks.

Ajalooliselt arenes töökindlusõpetus esmajärjekorras raadioelektroonika valdkonnas. Võib öelda, et põhjusi selleks oli kaks. Raadioelektroonika, võrreldes näiteks masinaehitusega, on suhteliselt noor, tormiliselt arenev teadusala ning tema puudused tulevad reljeefsemalt esile. Teiseks on elektroonikaaparatuuri detailide üldarv suur, kuid erinevate detailitüüpide arv suhteliselt väike. See võimaldas töökindlusõpetuse vajadusteks rakendada hästi väljakujunenud matemaatilisi distsipliine — tõenäosusteooriat ja matemaatilist statistikat. Töökindlusalaseid mõisteid ja nendevahelisi seoseid, mis algselt rakendati elektroonikaaparatuuri töökindluse iseloomustamiseks, võib väga hästi kasutada palju laiemas valdkonnas, näiteks aparaadiehituses üldse, masinaehituses jm.

Vaatleme mõningaid üldkasutatavaid mõisteid ja termineid, et vältida kaksipidi mõistmist edasises käsitluses. Tuleb rõhutada, et sisu, mille üks või teine tehniline distsipliin annab terminile, võib erineda selle sõna või termini sisust üldkasutatavas igapäevases kõnes, aga ka sama sõna või termini sisust mõnes teises teadusharus. Seepärast on iga teadusharu üheks peamiseks ülesandeks

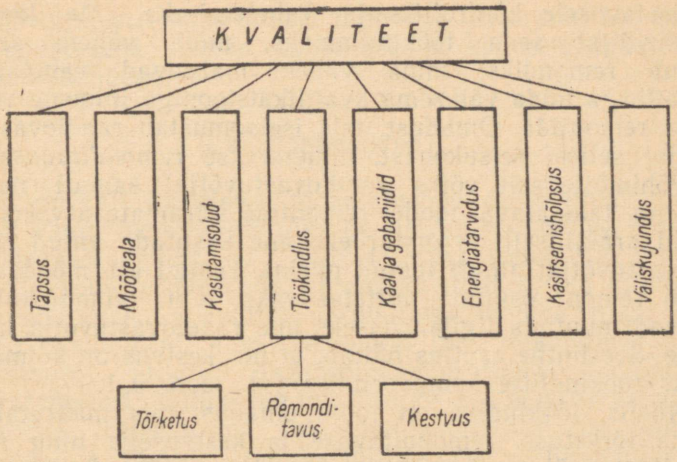
mõistete ja neile vastavate terminite kindla süsteemi väljatöötamine.

Toote all mõistetakse kõiki inimeste poolt valmistatud esemeid. Masinad, liiklusvahendid, raadiovastuvõtjad, elektronlambid, kondensaatorid, raketid, täitesulepead — need on mõningad juhuslikult loetletud tooted. Elektroonikaaparatuur hõlmab kitsama klassi tooteid, mille hulka kuuluvad näiteks raadiovastuvõtjad, televiisorid, lampvoltmeetrid, ostsilloskoobid, raadiosaatjad, raadiolokaatorid, elektronarvutid jne. Igal tootel on oma kindlad funktsioonid, mida ta peab täitma. Loomulikult on erinevate toodete, näiteks televiisori ja täitesulepea funktsioonid erinevad.

Mis on *toote kvaliteet*? Milline on seos toote kvaliteedi ja töökindluse vahel? Esitame küsimuse: kas toode võib olla kõrgekvaliteediline, kui tema töökindlus on madal. Kahel ühesuguse võimsusega elektrimootoril võib olla erinev kasutamise kestvus. Kas me võime rääkida, et nende kahe mootori kvaliteet on sama, kui nende kasutamise kestvus on erinev? Kas võib öelda, et töökindluse seisukohalt nad ei erine, kui esimest mootorit võib kasutada võib-olla kaks korda kauem (enne kui ta maha kantakse) kui teist? Loomulikult mitte, aga sageli siiski räägitakse kvaliteedist, töökindlusest ja kestvusest kui mõistetest, mis eksisteerivad n.-ö. üksteise kõrval.

Võib teha järelduse, et alustada tuleb kvaliteedi definitsioonist. Toote (sealhulgas ka elektroonikaaparatuuri) kvaliteedi all mõistetakse tema omaduste või parameetrite (kui neid omadusi saab iseloomustada arvuliselt) kogumit, mis määrab toote kõlblikkuse astme ettenähtud otstarbel kasutamiseks. Näiteks mõõteriista täpsust, mõõteala ulatust, väliskujundust, käsitsemise hõlpsust jne. käsitatakse kui tema kvaliteedi koostisosi. Kuna ka töökindlus (isegi täpsemalt defineerimata, mida me selle all mõistame) mõjutab toote kõlblikkuse astet ettenähtud otstarbel kasutamiseks (ettenähtud funktsioonide täitmiseks), siis on töökindlus üks kvaliteedi komponentidest. Järelikult on ta kitsam mõiste kui kvaliteet (vt. joon. 0. 1. 1).

Teiste mõistete selgitamiseks vaatleme mingit kindlat tüüpi raadiovastuvõtja «elukäiku» alates momendist, kui ta meie korteris üles seati, kuni momendini, kui me ta ära viskame. Pärast mingisuguse ajavahemiku möödu-



Joon. 0. 1. 1. Seos töökindlusmõistete vahel

mist tekib nn. tõrge: takisti põleb läbi, elektronlamp kaotab emissiooni, jootekoht murdub lahti jne. Iga kord pärast tõrke tekkimist remonditakse raadiovastuvõtjat, kusjuures remont seisneb peamiselt ühe või teise kõlbmatuks muutunud detaili väljavahetamises. Analüüsides paljude seda tüüpi raadiovastuvõtjate «elukäiku», on võimalik välja selgitada, kui sagedasti keskmiselt tekib tõrge, kui kaua kestab keskmiselt üks remont ning kui palju maksavad keskmiselt ühe remondi puhul vahetatud detailid. Töökindlamaks loeme seda tüüpi raadiovastuvõtjat, kus keskmine tõrgete arv on väiksem. Raadiovastuvõtja omadust säilitada töövõimet, teiste sõnadega, töötada, ilma et tekiks tõrkeid, nimetame *tõrketuseks* ehk *tõrgeteta töötamiseks*. Raadiovastuvõtja on seda töökindlam, mida paremad on tema tõrketust iseloomustavate parameetrite väärtused.

Kuid mitte ainult tõrketus ei määra raadiovastuvõtja töökindlust. Oletame, et kaht erinevat tüüpi raadiovastuvõtjatel on ühesugused tõrketust iseloomustavate parameetrite väärtused, s. t. teatud kindla ajavahemiku vältel esineb neil ühepalju tõrkeid. Kuid iga tõrke kõrvaldamiseks vajalik ajavahemik, s. t. remondi kestus, võib olla erinev tänu näiteks detailide erinevale juurde-

pääsetavusele kontrolliks ja vahetamiseks. Me loeme vastuvõtjat seda töökindlamaks, mida vähem aega kulub remondiks, mida vähem maksavad vahetatud detailid ja mida väiksema kvalifikatsiooniga inimene võib teda remontida. Omadust, mis iseloomustab raadiovastuvõtjat sellest seisukohast, nimetatakse *remonditavuseks.*

Põhimõtteliselt võiks raadiovastuvõtjat samuti nagu iga nn. taastatavat toodet remontida piiramata arv kordi. Kuid praktiliselt on otstarbekohane kasutada antud raadiovastuvõtjat ainult teatud piirini. Teatud aja möödudes võib remont osutuda mittetasuvaks, s. t. remondikulud võivad muutuda ligilähedaseks uue raadiovastuvõtja hinnale. See lihtne arutlus näitab, et nn. kestvus on kolmandaks töökindluse komponendiks (vt. joon. 0. 1. 1).

Niisiis, töökindlus on toote omadus, mis määratakse tema tõrketuse, remonditavuse ja kestvusega ning mis kindlustab ülesande täitmise tootele ettenähtud ulatuses.

Töökindlusõpetus põhineb tõenäosuslikel ja matemaatilis-statistilistel mõistetel. Masina või aparaadi tõrgete statistilise iseloomu mittearvestamine viib absurdsete järeldusteni. Esines kurioosum, kus ühe raadiovastuvõtjaid tootva tehase juhtivad spetsialistid viitasid oma toodangu kõrge töökindluse tõestamiseks tehnilise kontrolli osakonda saabunud ühele (!) kiitvale kirjale. Kui tehnilise kontrolli osakonda saabub tarbijailt sadu ja tuhandeid kirju, kes siis keelaks meid välja valimast teist laadi kirju ja selle põhjal tõestamast, et tehase toodang on halvim maailmas?

Teine näide. Vanemates käsiraamatutes märgitakse, et elektronlampide teenistusiga on 500 tundi. Mõned raadiospetsialistid järeldavad siit, et kõik elektroonikaaparatuuri lambid tuleb 500 tunni möödumisel välja vahetada. Kuid ometi on igal raadioamatööril teada, et antud konkreetne elektronlamp võib rivist välja langeda esimeste töötundide jooksul, aga võib töötada ka mitmeid tuhandeid tunde.

Tehasest väljalastava konkreetse elektrimootori, taksomeetri või lampvoltmeetri kohta ei või täie kindlusega öelda, mitu tundi ta töötab, enne kui tekib esimene tõrge. Üksikud neist võivad ülesseadmisel üldse mitte tööle hakata, mõni võib tõesti rivist välja langeda niinimetatud garantiiaja möödumisel, kuid nad võivad töötada ka aastaid. Seaduspärasused elektrimootori, taksomeetri või

lampvoltmeetri kasutamisel ilmnevad alles siis, kui tuleb tegemist teha sadade, tuhandete ja kümnete tuhandete eksemplaridega.

0.2. Põhimõisted

Järgnevalt käsitleme töökindlusõpetuse põhilisi mõisteid. Kuigi meie eesmärgiks on ülevaate andmine eeskätt elektroonikaaparatuuri töökindlusprobleemidest, näeb lugeja kohe, et põhimõisted allpool defineeritud kujul on rakendatavad ka «mitteelektroonsete» toodete, nagu tööpingid, mootorid, autod, lennukid jne., töökindluse analüüsimisel. Kuna elektroonikaaparatuuri töökindlus paratamatult sõltub raadiodetailide — elektrovaakuumseadiste, transistoride, takistite, kondensaatorite, induktiivpoolide, trafode, releede, lülitite jne. — töökindlusest, tuleb neid ka vaadelda meid huvitavast seisukohast.

Süsteem on koos tegutsevate, kindla ülesande iseseisvaks täitmiseks määratud objektide kogu. Objektide all mõistetakse tooteid (masinaid, seadmeid, aparaate ja nende osi), kuid ka keskkonda (näiteks keskkonda, kus levivad elektromagnetilised lained) ja teenindavat personali. Raadiosaatjad ja raadiovastuvõtjad või raadiolokaatorid moodustavad töökindluse seisukohalt näiteks koos atmosfääriga ning operaatoritega ühise süsteemi. Elektronarvuti puhul võivad süsteemi kuuluda veel ainult operaatorid, raadioelektronmõõteriista puhul pole neidki alati vaja.

Süsteemi element, lühidalt element, on süsteemi osa, mis on määratud kindlate funktsioonide täitmiseks.

Süsteemi ja elementi mõistame me töökindlusõpetuse seisukohalt. Nende terminite sisu teistes teadusharudes võib olla ja sageli ongi hoopis erinev. Jaotus «süsteem — element» on tinglik. Näiteks toiteseadmed (alaldid, stabilisaatorid), mis esinevad praktiliselt igasuguses aparatuuris ja on tihti konstruktiivselt iseseisev blokk, on nende raadiodetailide suhtes, millest ta koosneb, süsteem; kuid selle aparatuuri suhtes, mida ta toitepingetega varustab, võib toiteseadmeid vaadelda kui elementi. Seega kõrgema taseme element jaotub madalama taseme elementideks, need omakorda veel madalama taseme elementideks jne. Allpool mõistame enamasti süsteemi all aparatuuri, aga elemendi all raadiotehnilisi detaile.

Nii süsteem kui ka element võivad olla kahes seisundis. Korrasolek on süsteemi või elemendi seisund kindlal ajamomendil, kui nende kõik põhilised ja ka teisejärgulised parameetrid vastavad neile esitatud nõuetele. Teisejärguliste all mõistame me parameetreid, mis iseloomustavad süsteemi või elemendi käsitsemise hõlpsust, välisilmet jne. Vastupidi, rikkisolek on süsteemi või elemendi seisund, kui kas või üks põhiline või teisejärguline parameeter ei vasta esitatud nõuetele.

Töövõimeline seisund või, lühidalt, töövõime on süsteemi või elemendi seisund kindlal ajamomendil, kui nende kõik põhilised parameetrid, mis iseloomustavad süsteemi või elemendi funktsioonide normaalset täitmist, vastavad esitatud nõuetele. Vastasel korral on tegemist töökõlbmatu seisundiga.

Vaatleme järgmist näidet. Raadiolokaatorisse on sisse ehitatud ümberlülitiga mõõteriist, mille abil on võimalik kontrollida pingeid ja voolusid mitmesugustes punktides, teiste sõnadega, veenduda lokaatori korrasolekus. Oletame, et mingil põhjusel langes mõõteriist rivist välja. Sel juhul jääb lokaator töövõimeliseks, kuid osutub mittekorras- või rikkisolevaks, kuna ta oma põhilisi funktsioone täidab, aga käsitsemine on raskendatud.

Tõrge seisneb süsteemi või elemendi töövõime kaotuses. Tõrke põhjuseks võib olla põhiliste parameetrite mittevastavus esitatud nõuetele, aga ka teenindava personali ebaõige tegevus.

Sõnal «tõrge» on igapäevases keelepruugis veidi teistsugune tähendus. Tuletagem meelde sõna «moment» tähendust igapäevases keeles ja mehaanikas.

Tõrketus ehk tõrgeteta töötamine on süsteemi või elemendi omadus pidevalt säilitada töövõimet kindlates kasutamisoludes.

Taastatavus on süsteemi või elemendi omadus, mis võimaldab saada süsteemi või elemendi parameetrite lubatud (nende hulgas esialgseid) väärtusi rikkisoleku kõrvaldamise tagajärjel. Süsteeme ja elemente võib liigitada taastatavateks ja mittetaastatavateks. Mittetaastatavaks on näiteks element, mis tõrke tekkimise korral ei kuulu taastamisele või mida ei saa taastada. Reeglina on raadiodetailid mittetaastatavad. Raadiovastuvõtja ja televiisor kuuluvad taastatavate süsteemide hulka.

Remonditavuseks nimetatakse süsteemi või elemendi

omadust, mis seisneb kohandatuses tõrgete avastamiseks ja kõrvaldamiseks, aga samuti nende ennetamiseks. Kui element on mittetaastatav (ühekordse kasutamisega), mõistetakse remonditavuse all elemendi kohandatust kontrolliks ja hõlpsaks vahetamiseks.

Taastatava süsteemi või elemendi kestvus on süsteemi või elemendi omadus säilitada pikaajaliselt (võimalike vaheaegadega remondiks) töövõimet kindlates kasutamisoludes kuni purunemiseni või mõne teise äärmusliku seisundini. Äärmuslik seisund võib tekkida süsteemi või elemendi parameetrite muutumise tagajärjel, aga võib olla ka määratud majanduslike näitajatega (kui näiteks remondikulud muutuvad ligilähedasteks uue süsteemi või elemendi hinnale).

Nüüd võime defineerida süsteemi ja elemendi (või üldiselt — toote) töökindluse. Töökindlus on süsteemi või elemendi omadus, mis määratakse nende tõrketuse, remonditavuse ja kestvusega ning mis kindlustab ülesande täitmise süsteemile või elemendile ettenähtud ulatuses.

Eespool nägime, et korrasolek, rikkisolek ja töövõime tähistavad süsteemi või elemendi seisundeid. Tõrge kujutab endast teatud kindlat sündmust. Tõrketus, remonditavus ja kestvus on seevastu süsteemi või elemendi omadused. Järelikult on ka töökindlus süsteemi või elemendi omadus.

Töökindlus on suhteliselt noor teaduslik-tehniline distsipliin ja mõisted, mida ta kasutab, arenevad koos selle teadusharuga. Mitte väga ammu samastati töökindluse mõiste tõrketuse mõistega ja veel praegugi mõistavad mitmed autorid töökindluse all just tõrketust. Hiljem hakati töökindluse all mõistma omadust, mis on määratud peaasjalikult tõrketuse ja remonditavusega [25]. Viimasel ajal kasutatakse töökindluse definitsiooni järjest rohkem sellisel kujul, nagu ta toodi eespool, s. t. kui ta haarab tõrketust, remonditavust ja kestvust [26].

Edaspidi tuleb meil kasutada mingit suurust süsteemi või elemendi töötamise kestuse või mahu mõõtmiseks. Olenevalt süsteemist või elemendist, mida me vaatleme, võib selliseks suuruseks olla töötamise vältus, talitluse vältus, töötsüklite arv, lülimiste arv jne. Edaspidi kasutame selleks terminit «tööaeg», mis oma lühiduse tõttu on eluõiguse leidnud. Muidugi tuleb meeles pidada, et

Tabel 0.1.1

Tõrgete klassifikatsioon

Liigituse alus			Tõrke liik	
I. Parameetri muutmise iseloom tõrke tekkimise momendini			Järsk tõrge	
			Aeglane tõrge	
II. Seos teiste tõrgetega			Sõltumatu tõrge	
			Sõltuv tõrge	
III. Edaspidise kasutamise võimalus pärast tõrke tekkimist			Täistõrge	
			Osatõrge	
IV. Tõrke kõrvaldamise iseloom			Püsitõrge	
			Isekõrvalduv tõrge	Hetktõrge
				Korduv hetktõrge
V. Väliste tunnuste olemasolu			Ilmne tõrge	
			Varjatud tõrge	
VI. Tekkimise põhjus	Konstruktsioon	Konstruktori viga	Konstruktsiooniline tõrge	
		Konstrueerimismeetodite ebatäiuslikkus		
	Tootmine	Tootmisviga — ettenähtud tehnoloogia rikkumine	Tehnoloogiline tõrge	
		Ebatäpne tehnoloogia		
	Ekspluatatsioon	Ekspluatatsioonireeglite rikkumine	Ekspluatatsiooniline tõrge	
		Ettenähtud välistest ekspluatatsioonitingimustest kõrvalekaldumine		
VII. Tekkimise iseloom			Loomulik tõrge	
			Kunstlikult tekitatud tõrge	
VIII. Tõrke tekkimise aeg			Tõrge sissekütmisel	
			Tõrge normaaltöö perioodil	
			Tõrge tööperioodi viimasel osal	

sõna «aeg» kasutame siin «ajavahemiku» mõttes või veelgi täpsemalt — «ajavahemiku kestuse» mõttes. Vajaduse korral (näit. kui meil on tegemist releedega) tuleb «tööaeg» asendada vaadeldavale süsteemile või elemendile iseloomulikuma terminiga (näit. töötsüklite arvuga). Ka sõna «töö» võib esile kutsuda vastuväiteid (füüsikalises mõttes elektroonikaaparatuur reeglina mingit tööd ei tee), kuid vaadeldes sõna «tööaeg» kui kindlat terminit, langeb see vastuväide ära.

Peatume pikemalt sellisel tähtsal mõistel nagu tõrge. Elektroonikaaparatuuris esinevad väga mitmesuguse iseloomuga tõrked, kusjuures nende tõrgete tekkimise ja esinemise seaduspärasused on erinevad. Esitame siin tõrgete klassifikatsiooni sel kujul, nagu see käesolevaks ajaks on välja kujunenud. Juhime vaid tähelepanu sellele, et klassifitseerimine toimub mitmesuguste tunnuste järgi (mitmesugustel alustel) ja et võib eristada 8 enam või vähem väljakujunenud klassifitseerimise alust.

Nagu eespool defineeritud, seisneb tõrge süsteemi või elemendi töövõime kaotuses, teiste sõnadega, sündmuses, mis kujutab endast elemendi või süsteemi normaalset funktsioneerimist iseloomustavate põhiliste parameetrite väljaminekut mingitest konkreetsetest, iga elemendi ja süsteemi jaoks erinevatest piiridest. Takisti puhul räägime tõrkest, kui tema väärtus läheb välja ettenähtud, näiteks 0,5%-listest piiridest. Võimenduslambi puhul räägime tõrkest, kui tema tõus mingil põhjusel muutub väiksemaks mingist kindlast etteantud väärtusest. Juba nende kahe näite põhjal täheldame kahte erisugust laadi tõrkeid. Kui näiteks takistis tekib vooluringi katkestus kas takisti läbipõlemise või väljaviigu murdumisel, muutub takistus suhteliselt kiiresti oma esialgsest väärtusest lõpmatuseni. Võimenduslambi kütteniidi läbipõlemisel väheneb tõus järsult nullini. Selliseid tõrkeid, mis tekivad elemendi või süsteemi ühe või mitme põhilise parameetri väärtuse hüppelise muutumise tagajärjel, nimetatakse järskudeks.

Kuid teisest küljest on hästi tuntud takistite nn. vananemine, mis avaldub nende väärtuse aeglases järkjärgulises muutumises. Võimenduslampidel esineb emissiooni pidev vähenemine, mis omakorda võib väljenduda selliste parameetrite nagu tõus, võimendustegur jne. muutumises. Aja jooksul tekivad niivõrd suured muutused, et takistus,

tõus jne. lähevad välja lubatud piiridest. Tõrkeid, mis tekivad elemendi või süsteemi ühe või mitme parameetri väärtuse järkjärgulise muutumise tagajärjel, nimetatakse aeglasteks tõrgeteks. Näiteks pärast võimenduslambi aeglast tõrget tema põhiline funktsioon — elektriliste signaalide võimendamine — kestab, kuid võimendustegur on väiksem lubatud väärtusest. Siinjuures me ei vaatle, kuidas määratakse elemendi või süsteemi parameetrite lubatud väärtused, kas elemendi tehnilistes tingimustes fikseeritud väärtustega, elemendi kohaga elektrilises skeemis või mingil muul viisil. Samuti on selge, et tõrgete jaotus järskudeks ja aeglasteks on tinglik ning mida rohkem me saame teada tõrgete põhjuseks olevate protsesside olemusest, seda rohkem tõrkeid me võime üle viia «järskude» klassist «aeglaste» klassi.

Tõrgete jaotamisel järskudeks ja aeglasteks on klassifitseerimise aluseks parameetri muutumise iseloom tõrke tekkimise momendini. Tõrgete jaotamisel sõltumatuteks ja sõltuvateks on aluseks seos teiste tõrgetega. Näiteks võib elektroodidevaheline lühis elektronlambis esile kutsuda lambiga järjestikku lülitatud takisti läbipõlemise. Esimest tõrget loeme sõltumatuks, teist tõrget sõltuvaks. Edaspidi vaatleme peaaegu eranditult sõltumatuid tõrkeid. Kui sõltumatu tõrkega kaasnes üks või mitu sõltuvat tõrget, siis nii teoreetilistes arutlustes kui ka statistilise materjali ümbertöötamisel loeme, et esines ainult üks tõrge.

Tõrke kõrvaldamise iseloomu järgi liigitatakse tõrkeid püsi- ja isekõrvalduvaiks tõrgeteks. Püsitõrget saab kõrvaldada ainult elementide väljavahetamisega ja reguleerimisega. Isekõrvalduvate tõrgete puhul taastub elemendi või süsteemi töövõime iseenesest ilma teenindava personali vahelesegamiseta. Isekõrvalduvate tõrgete põhjuseks võib olla mingisuguse välismõju lubatust suurem juhuslik väärtus või mitmesuguste välismõjude selline juhuslik kombinatsioon, mis mõjub vaadeldavale parameetrile ühes suunas ja tingib lubatust suurema parameetri muutumise isegi juhul, kui iga välismõju üksikult ei ületaks ekspluatatsioonitingimustes ettenähtud piire. Sageli jääb isekõrvalduva tõrke põhjus teadmatuks, kuna põhjuse avastamiseks vajalik aeg on lühem tõrke kestusest. Elektronarvutites ja analoogilises aparatuuris esineb isekõrvalduvate tõrgete eriliik — väikese kestusega nn. hetktõrge. Hetktõrked tekivad mitmesuguste väliste segavate häirete

ja sisemiste mürade tagajärjel. Isekõrvalduvate, nende hulgas ka hetktõrgete põhjuste konkretiseerimiseks on loomulikult vaja konkretiseerida ka seda, millist aparatuuri vaadeldakse ja millised on tema kasutamisolud.

Ilmse tõrke puhul ei ole vaja mingit spetsiaalset aparatuuri ega spetsiaalseid mõõtmisi, et veenduda elemendi või süsteemi töövõime kaotuses. Vastupidi, varjatud tõrke avastamiseks on vaja teha spetsiaalseid mõõtmisi spetsiaalse aparatuuri abil. Siinjuures tuleb peatuda kolmel varjatud tõrgetega seotud iseärasusel.

Esiteks, varjatud tõrked on teatud mõttes ohtlikumad kui ilmsed tõrked. Ilmse tõrke tekkimisel katkestatakse süsteemi või elemendi kasutamine ning ta remonditakse (töövõime taastatakse). Kui me aga näiteks mõõdame mingit suurust elektronmõõteriistaga (millel muidugi ei ole ilmset tõrget), siis faktiliselt me kunagi ei tea, kas see mõõteriist on töövõimeline, kas mõõteviga asub lubatud piirides või mitte, s. t. kas esineb või ei esine varjatud tõrge. Olenevalt konkreetsest olukorrast võivad sellega kaasneda suuremad või väiksemad kahjud.

Teiseks, kogemused näitavad, et varjatud tõrgete esinemissagedus elektroonikaaparatuuris on võrreldav ilmsete tõrgete esinemissagedusega, aga mõnikord on see isegi suurem. Seetõttu osutuvad vajalikuks tehnilised ja organisatsioonilised abinõud varjatud tõrgete puudumises veendumiseks, näiteks süsteemiga ühe terviku moodustavad kontrollseadmed, süsteemi parameetrite perioodiline kontroll jne.

Ja kolmandaks, varjatud tõrge ei pea ilmtingimata olema aeglane tõrge, kuigi on põhjust arvata, et see paljudel juhtudel või isegi enamasti on nii.

Tõrgete liigitus erinevate tunnuste järgi on toodud klassifikatsioonitabelis (vt. tabel 0. 1. 1).

Kuna liigituse alused on erinevad, on näiteks madalsagedusvõimendi lambi kütteniidi läbipõlemine üheaegselt järsuks, ilmseks ja püsivaks tõrkeks.

Elektroonikaaparatuuri töökindluse kohta kogunenud eksperimentaalset ja teoreetilist materjali on juba niivõrd palju, et isegi enam-vähem täieliku ülevaate andmiseks on tarvis tunduvalt rohkem raamatu mahtu, kui seda võimaldab käesolev raamat. Me käsitleme sellepärast ainult neid küsimusi, mis on lugejaskonnale kõige hädavajalikumad.

1.

Töökindlusparameetrid

1.1. Mittetaastatavate elementide ja süsteemide tõrketusparameetrid

Käesolevas peatükis selgitame toodete nn. töökindlusparameetrite mõistet ja tutvume lihtsamate matemaatiliste seostega nende vahel. Peame vajalikuks vaadelda mittetaastatavaid ja taastatavaid elemente ning süsteeme eraldi paragrahvides. Taastatavate elementide ja süsteemide töövõimet on võimalik pärast tõrke tekkimist taastada üksikute detailide asendamisega, reguleerimisega jne. Sel juhul huvitab meid remondi kestus, remondiga seotud kulud ja veel terve rida suurusi, mis ühel või teisel viisil iseloomustavad remonti. Taastatavate elementide ja süsteemide töötamisperioodid vahelduvad ajavahemikega, millal element või süsteem on remondis. Need tehnilised iseärasused peavad avalduma ka vastavas matemaatilises käsitluses.

Mittetaastatavate toodete hulka kuuluvad peaaegu kõik raadiodetailid, enamik süsteeme kuulub aga taastatavate toodete hulka. Mittetaastatava süsteemi näiteks võib olla kompaundi valatud unifitseeritud sõlm. Teisest küljest, kui me vaatleme taastatavat süsteemi ja meid huvitab tema «elukäik» kuni esimese tõrke tekkimiseni, võime seda süsteemi vaadelda kui mittetaastatavat.

Asume nüüd vahenditult mittetaastatavate toodete töökindlust iseloomustavate suuruste vaatlemisele.

Tõrketus, remonditavus ja kestvus on süsteemi ning elemendi omadused. Selles suhtes on nad sama kategooria mõisted nagu näiteks mõõteriista täpsus. Mõõteriista täpsuse all mõistetakse suuruse mõõdetud väärtuse lähedusastet mõõdetava suuruse tegelikule väärtusele. Täpsust kui mõõteriista omadust võib arvuliselt iseloomus-

tada mitmesuguste nn. parameetritega. Sellisteks parameetriteks on keskmine viga, maksimaalne viga, ruutkeskmine viga, mõõtetulemuste dispersioon jne. Analoogiliselt tuleb ka toote tõrketust, remonditavust ja kestvust iseloomustada kindlate tõrketuse, remonditavuse ning kestvuse parameetrite abil, millel on kindla süsteemi või elemendi jaoks kindel arvuline väärtus.

Tuletame eelnevalt meelde mõned lihtsamad tõenäosusteooria mõisted.

Jaotusfunktsiooniks $F(x)$ nimetatakse niisugust funktsiooni, mis iga x väärtuse juures määrab tõenäosuse, et juhuslik muutuja ξ omandab väiksema väärtuse kui x, s. o.

$$F(x) = P\{\xi < x\}.$$

$F(x)$ on x mittekahanev funktsioon. Ta muutub vahemikus $0 \ldots 1$; $F(-\infty) = 0$; $F(\infty) = 1$.

Kui tõenäosust $P\{x \leqslant \xi < x + \mathrm{d}x\}$, et pidev juhuslik muutuja võtab väärtuse lõpmatu väikesest vahemikust $(x,\ x + \mathrm{d}x)$, saab kirjutada kujul

$$P\{x \leqslant \xi < x + \mathrm{d}x\} = f(x)\,\mathrm{d}x,$$

siis funktsiooni $f(x)$ nimetatakse pideva juhusliku muutuja tõenäosustiheduseks (vt. joon. 1.1.1, *a*).

Tõenäosus $P\{x_1 \leqslant \xi < x_2\}$, et pidev juhuslik muutuja ξ võtab väärtuse lõplikust vahemikust $(x_1,\ x_2)$, avaldub tõenäosustiheduse definitsiooni abil järgmiselt (vt. viirutatud pindala joon. 1.1.1, *b*):

$$P\{x_1 \leqslant \xi < x_2\} = \int_{x_1}^{x_2} f(u)\,\mathrm{d}u,$$

kus u on integreerimismuutuja.

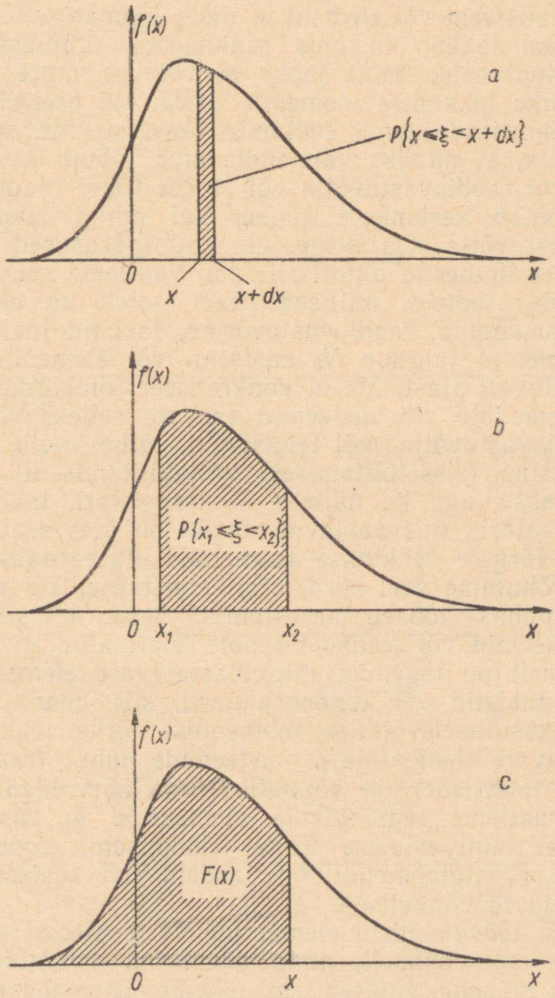
Definitsiooni järgi määrab pideva juhusliku muutuja jaotusfunktsioon tõenäosuse, et juhusliku muutuja ξ väärtus on väiksem kui x, s. t. tõenäosuse $P\{-\infty < \xi < x\}$, et juhusliku muutuja ξ väärtus asub vahemikus $(-\infty,\ x)$. Teisest küljest võib selle tõenäosuse väljendada tõenäosustiheduse abil (vt. joon. 1.1.1, *c* viirutatud pindala):

$$F(x) = P\{\xi < x\} = P\{-\infty < \xi < x\} = \int_{-\infty}^{x} f(u)\,\mathrm{d}u.$$

Viimasest valemist on näha, et formaalselt võib tõe-

näosustihedust $f(x)$ vaadelda kui jaotusfunktsiooni $F(x)$ esimest tuletist:

$$f(x) = \frac{\mathrm{d}F(x)}{\mathrm{d}x}.$$



Joon. 1. 1. 1. Tõenäosustiheduse graafikud

Kuna $F(\infty) = 1$, siis

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(u)\,du = 1,$$

s. t. pindala tõenäosustiheduse graafiku ja abstsisstelje vahel võrdub 1-ga.

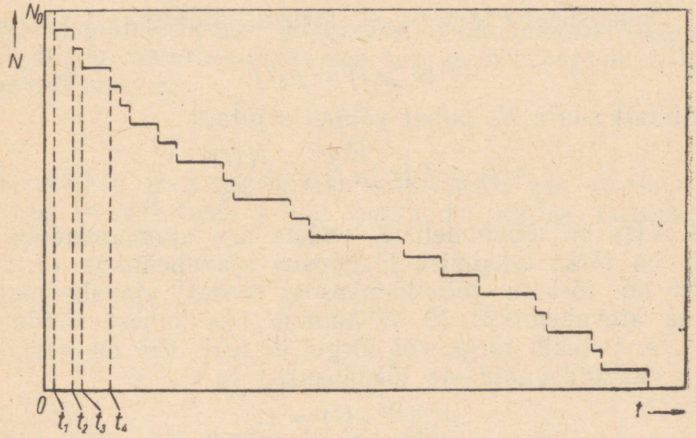
Ükski süsteem või element ei tööta lõpmatuseni: varem või hiljem lakkab ta oma funktsioone täitmast, tekib tõrge. Konkreetse toote jaoks ei või me mitte midagi öelda tõrke tekkimise momendi kohta, me praktiliselt ei suuda ennustada tema töötamise kestust. Me suudame vaid väita, et näiteks võimenduslamp töötab keskmiselt kauem kui raadiovastuvõtja või et üht tüüpi raadiovastuvõtja töötab keskmiselt kauem kui mingi teist tüüpi raadiovastuvõtja. On selge, et seaduspärasused tõrgete tekkimises ilmnevad ainult siis, kui vaatleme suurt hulka ühte tüüpi tooteid, millised need tooted ka ei oleks: võimenduslambid, raadiovastuvõtjad, takistid jne.

Oletame, et jälgime N_0 süsteemi või elemendi käitumist sõltuvalt ajast. Me ei konkretiseeri olukorda, milles need elemendid või süsteemid asuvad: selleks võib olla N_0 raadiovastuvõtjat või televiisorit, mille voolu all olemise kestus (sisselülitamisest väljalülitamiseni) täpselt fikseeritakse, aga ka näiteks N_0 transistori, takistit või kondensaatorit, mis vastaval stendil on üles seatud katseteks. Tõrgete tekkimise momendid fikseeritakse, kusjuures rõhutame veel kord, et fikseeritakse, kui nii võib öelda, «puhas» tööaeg, arvestamata aega, mil vaadeldavad süsteemid või elemendid pole koormatud.

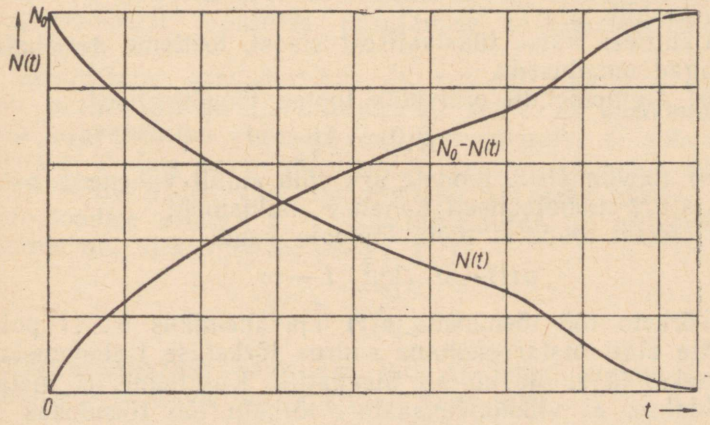
Kui meil on tegemist mittetaastatavate elementidega, näiteks takistid või kondensaatorid, siis nende elukäik kestab kasutuselevõtmise momendist tõrke tekkimiseni. Taastatavate elementide ja süsteemide puhul (raadiovastuvõtja, televiisor) on võimalik tõrge kõrvaldada. Siinkohal vaatleme taastatavate elementide ja süsteemide töötamist kuni esimese tõrke tekkimiseni. Loomulikult eeldame, et algmomendil on vaadeldavad süsteemid või elemendid töövõimelised.

Niisiis, töövõimeliste elementide või süsteemide arv N väheneb monotoonselt: mida pikem on vaadeldav ajavahemik t, seda väiksem on töövõimeliste toodete arv. Me võime joonisel kujutada töövõimeliste elementide või

süsteemide arvu N sõltuvuse ajast t. Tüüpiline sõltuvus on toodud joonisel 1. 1. 2, kus t_1, t_2, t_3 on tõrgete tekkimise momendid. Kui on tegemist küllalt paljude toodetega, ei ole astmelisus enam märgatav ja me saame joonisel 1. 1. 3 näidatud kõvera.



Joon. 1. 1. 2. Töövõimeliste toodete arvu N vähenemine aja t jooksul (N_0 on väike)



Joon. 1. 1. 3. Töövõimeliste toodete arvu $N(t)$ vähenemine aja jooksul (N_0 on suur)

Oletame, et meil on teada antud tüüpi toodete jaoks sõltuvus $N = N(t)$. Kuid sellele vaatamata ei või me tõrke tekkimise täpse momendi kohta üksikus seda tüüpi tootes mitte midagi öelda. Me võime ainult määrata tõenäosuse $P\{\tau < t\}$, et tõrketu tööaeg τ on väiksem kui t:

$$P\{\tau < t\} = q(t), \qquad (1.1.1)$$

või tõenäosuse $P\{\tau \geqslant t\}$, et tõrketu tööaeg on suurem kui t:

$$P\{\tau \geqslant t\} = p(t). \qquad (1.1.2)$$

Küllalt suure N_0 puhul võime kirjutada:

$$p(t) = P\{\tau \geqslant t\} = \frac{N(t)}{N_0}, \qquad (1.1.3)$$

kus $N(t)$ on töövõimeliste toodete arv ajamomendiks t, $q(t)$ on tõrke tekkimise tõenäosus ajavahemikus $(0, t)$; $p(t)$ on tõrketu töö tõenäosus samas ajavahemikus. Kuna ajavahemikus $(0, t)$ toimub üks kahest sündmusest, s. t. tekib tõrge või tõrget ei teki, siis on $p(t)$ ja $q(t)$ vastandsündmuste tõenäosused ja

$$p(t) + q(t) = 1. \qquad (1.1.4)$$

Avaldisest 1.1.3 näeme, et funktsioonid $N(t)$ ja $p(t)$ erinevad teineteisest ainult konstantse teguri $\frac{1}{N_0}$ poolest. Järelikult erineb $p(t)$ graafik $N(t)$ graafikust ainult mastaabilt.

Lähtudes katse füüsikalisest sisust, loetleme $p(t)$ mõningad omadused:

a) algmomendil olid kõik tooted töövõimelised;

$$p(0) = 1;$$

b) töövõimeliste toodete arv võib ainult väheneda: $p(t)$ on aja t monotoonselt kahanev funktsioon;

c) ükski toode ei tööta lõpmata kaua:

$$p(t) \to 0, \quad \text{kui} \quad t \to \infty.$$

Tõrketu töö tõenäosus $p(t)$ ajavahemikus $0 \ldots t$ pole mitte alati otstarbekohane suurus tõrketuse iseloomustamiseks: ta ei ole küllalt ülevaatlik. Kujutleme, et meile öeldakse, et vilkkondensaatori tõrketu töö tõenäosus 1 tunni jooksul on 0,999999. Meil on raske hinnata, kas selle kondensaatori tõrketus on suur või väike. Selle-

pärast kasutatakse tõrketuse hindamiseks veel teisi parameetreid.

Vaatleme tõrgete tekkimise kiirust. Oletame, et ajavahemikus $(t, t+\Delta t)$ tekkis $-\Delta N$ tõrget (ΔN on negatiivne, $-\Delta N$ järelikult positiivne), niisiis on tõrgete tekkimise kiirus $\frac{-\Delta N}{\Delta t}$. Kuna meid huvitab parameeter, mis iseloomustab toodet sõltumata vaadeldavate toodete arvust, on otstarbekohane see suurus läbi jagada N_0-ga. Saadud suurust

$$\frac{-\Delta N}{N_0 \Delta t}$$

nimetatakse tõrkesageduseks, täpsemalt, see suurus on suurte N_0 väärtuste puhul ligikaudu võrdne tõrkesagedusega $f(t)$:

$$f(t) = \frac{-1}{N_0} \frac{\mathrm{d}N(t)}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t} \qquad (1.1.5)$$

või

$$f(t) = -\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t}. \qquad (1.1.6)$$

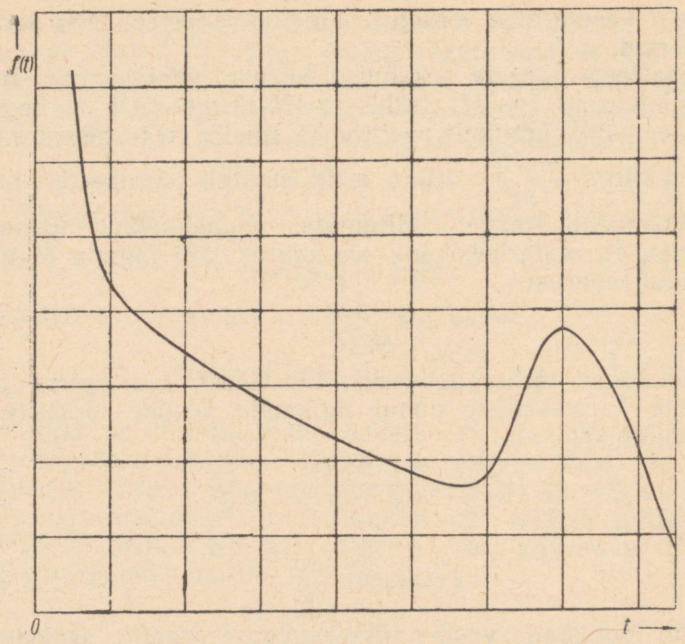
Kui joonistada vastav tõrkesageduse graafik, saaksime joonisel 1.1.4 toodud kõvera. Vasakpoolses osas on graafik langev, mis näitab, et töövõimeliste toodete arvu vähenemisel väheneb ka rivist väljalangemiste, s. t. tõrgete absoluutne arv. Sellepärast on ka sellel töökindlusparameetril praktilise kasutamise seisukohast oma puudused.

Moodustame ajavahemikus $(t, t+\Delta t)$ tõrkunud toodete arvu $-\Delta N$ ja ajavahemiku Δt suhte. Et iseloomustada ajavahemiku alguseks (s. o. momendiks t) töövõimeliste toodete arvu vähenemise kiirust, jagame selle suhte mitte N_0-ga, vaid ajavahemiku alguseks töövõimeliste toodete arvuga $N(t)$. Saadud suurus on ligikaudu võrdne nn. tõrkeintensiivsusega $\lambda(t)$:

$$\lambda(t) \cong \frac{-\Delta N}{N(t)\Delta t}.$$

Tõrkeintensiivsuse saaksime, kui Δt lähendaksime 0-le (muidugi peab N_0 olema küllalt suur arv):

$$\lambda(t) = \frac{-1}{N(t)} \cdot \frac{\mathrm{d}N(t)}{\mathrm{d}t}. \qquad (1.1.7)$$



Joon. 1. 1. 4. Tõrkesageduse $f(t)$ graafik

Joonistame tõrkeintensiivsuse graafiku (joon. 1. 1. 5) niisamuti nagu tõrkesageduse jaoks. Viimasest valemist järeldub, et

$$\mathrm{d}N(t) = -\lambda(t)N(t)\,\mathrm{d}t. \qquad (1.1.8)$$

Tõrkeintensiivsust võib tõlgendada ka järgmiselt. Leiame tõenäosuse, et süsteemi või elemendi tõrge tekib ajavahemikus $(t,\ t+\mathrm{d}t)$. Sündmust, et tõrge tekib vahemikus $(t,\ t+\mathrm{d}t)$, tuleb vaadelda kui liitsündmust: esimene sündmus seisneb tõrketus töös vahemikus $0\ldots t$ ja teine sündmus tõrke tekkimises vahemikus $(t,\ t+\mathrm{d}t)$. Tõenäosuste korrutamise teoreemi põhjal

$$\mathrm{d}q(t) = p(t)\,\mathrm{d}q(t/0,\ t),$$

kus $\mathrm{d}q(t)$ on tõrke tekkimise tõenäosus vahemikus $(t,\ t+\mathrm{d}t)$ ja $\mathrm{d}q(t/0,\ t)$ on tõrke tekkimise tinglik tõenäosus ajavahemikus $t,\ t+\mathrm{d}t$ eeldusel, et element või süsteem

töötas tõrgeteta vahemikus $(0, t)$. Tingliku tõenäosuse $dq(t/0, t)$ kirjutame kujul

$$dq(t/0, t) = \lambda(t)\,dt.$$

Viimane avaldis tõendab, et mida suurem on vaadeldav ajavahemik dt, seda suurem on tõrke tekkimise võimalus. Siin on $\lambda(t)$ tõrke tekkimise tinglik tõenäosus ühes ajaühikus momendil t. Pärast asendust saame:

$$dq(t) = p(t)\lambda(t)\,dt \qquad (1.1.9)$$

või

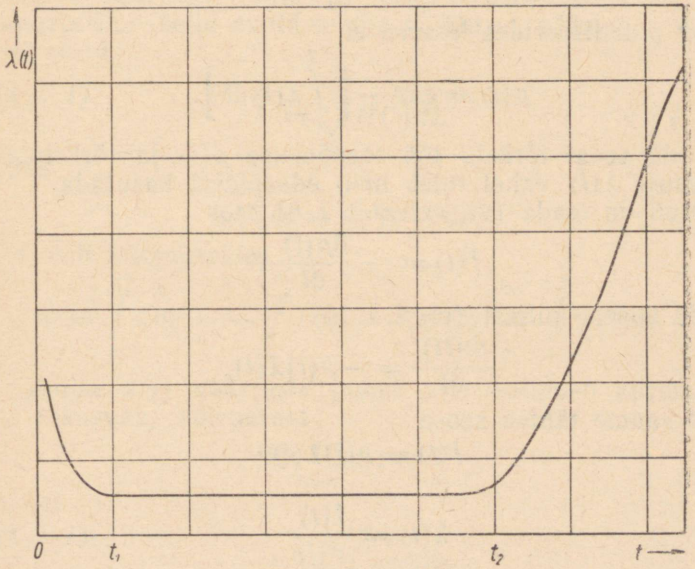
$$-\frac{dN(t)}{N_0} = \frac{N(t)}{N_0}\lambda(t)\,dt,$$

kuna

$$dq(t) = d\left[\frac{N_0 - N(t)}{N_0}\right] = -\frac{dN(t)}{N_0}.$$

Pärast mõlemate poolte korrutamist N_0-ga saame:

$$dN(t) = -\lambda(t)N(t)\,dt.$$



Joon. 1.1.5. Tõrkeintensiivsuse $\lambda(t)$ graafik

Siit ja avaldisest (1. 1. 8) järeldame, et tinglik tõenäosus $\lambda(t)$ langeb kokku tõrkeintensiivsuse mõistega.

Nägime, et tõrketuse iseloomustamiseks võib kasutada selliseid parameetreid nagu tõrketu töö tõenäosust $p(t)$, tõrkesagedust $f(t)$ ja tõrkeintensiivsust $\lambda(t)$. Leiame seose nende parameetrite vahel.

Kuna $\mathrm{d}q(t) = -\mathrm{d}p(t)$, siis

$$\mathrm{d}p(t) = -p(t)\lambda(t)\,\mathrm{d}t. \qquad (1.1.10)$$

Lahendame selle diferentsiaalvõrrandi:

$$\frac{\mathrm{d}p(t)}{p(t)} = -\lambda(t)\,\mathrm{d}t,$$

$$\int_0^t \frac{\mathrm{d}p(t)}{p(t)} = -\int_0^t \lambda(t)\,\mathrm{d}t,$$

$$\ln p(t) - \ln p(0) = -\int_0^t \lambda(t)\,\mathrm{d}t.$$

Kuna $p(0) = 1$, siis

$$\ln p(t) = -\int_0^t \lambda(t)\,\mathrm{d}t$$

ning potentseerides leiame, et

$$p(t) = \exp -\left[\int_0^t \lambda(t)\,\mathrm{d}t\right]. \qquad (1.1.11)$$

Seda seost tõrketu töö tõenäosuse $p(t)$ ja tõrkeintensiivsuse $\lambda(t)$ vahel tuleb meil edaspidigi kasutada.

Meil on teada (vt. valem 1. 1. 6) seos

$$f(t) = -\frac{\mathrm{d}p(t)}{\mathrm{d}t}.$$

Kuid teisest küljest (vt. 1. 1. 10)

$$\frac{\mathrm{d}p(t)}{\mathrm{d}t} = -p(t)\lambda(t).$$

Siit saame tähtsa seose

$$f(t) = p(t)\lambda(t)$$

või

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{p(t)} \qquad (1.1.12)$$

kolme tõrketusparameetri vahel.

Vaatleme tõrke tõenäosust $q(t)$ ja tõrkesagedust $f(t)$, mida nad kujutavad tõenäosusteooria seisukohalt. Definitsiooni järgi on $q(t)$ tõenäosus, et juhuslik ajavahemik τ ajamomendist 0 kuni tõrke tekkimise momendini on väiksem kui t:

$$q(t) = P\{\tau < t\}.$$

Kuid $P\{\tau < t\}$ tähendab juhusliku ajavahemiku τ integraalset jaotusfunktsiooni, mille tähistame tähisega $F(t)$. Niisiis

$$F(t) = q(t).$$

Juhusliku muutuja τ tõenäosustihedus on definitsiooni järgi tuletis jaotusfunktsioonist $F(t)$. Kuid

$$\frac{\mathrm{d}F(t)}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}q(t)}{\mathrm{d}t} = f(t).$$

Järelikult võime tõrkesagedust $f(t)$ vaadelda kui tõrketu tööaja τ tõenäosustihedust.

Üks ülevaatlikumaid töökindlusparameetreid on keskmine tõrketu tööaeg t_k. Selle leidmiseks peame juhusliku muutuja τ võimalikud väärtused t $(t \geqslant 0)$ korrutama vastava väärtuse esinemise tõenäosustihedusega $f(t)$ ja integreerima selle avaldise üle kõikide t väärtuste, s. o. 0-st ∞-ni:

$$t_k = \int_0^\infty t f(t)\,\mathrm{d}t. \qquad (1.1.13)$$

Kuna

$$f(t)\,\mathrm{d}t = \mathrm{d}q = -\mathrm{d}p,$$

siis ositi integreerides

$$t_k = \int_0^\infty t\,\mathrm{d}q = -\int_0^\infty t\,\mathrm{d}p = -tp(t)\,\Big|_0^\infty + \int_0^\infty p(t)\,\mathrm{d}t.$$

Lõplike $\lambda(t)$ väärtuste puhul $p(t)$ kahaneb kiiremini, kui t kasvab; sellepärast

$$\lim_{t\to\infty} t\,p(t) = 0$$

ja siit

$$t_k = \int_0^\infty p(t)\,\mathrm{d}t. \qquad (1.1.14)$$

Analüüsime, kas ja millistel tingimustel võib toote garantiiaega vaadelda kui tõrketusparameetrit. Oletame, et kahel ühe ja sellesama funktsiooni täitmiseks määratud tootel on erinev garantiiaeg, esimesel näiteks 12 kuud ja teisel 18 kuud.

Kas võime siit teha järelduse, et teist tüüpi toote töökindlus on 1,5 korda suurem? Tihti vastatakse sellele küsimusele pikemalt mõtlemata jaatavalt, kuigi selline vastus on absurdne. Formuleering «toote garantiiaeg on 12 kuud» tähendab seda, et toodet valmistav tehas garanteerib toote tasuta ümbervahetamise või remondi, kui 12 kuu jooksul tekib tootes tõrge. Siit me ei või järeldada, kui tihti tekivad tõrked 12 kuu jooksul, teiste sõnadega, kuivõrd tõrketu, töökindel, kvaliteetne on toode. Kui näiteks kõikidele raadiovastuvõtjatele on määratud ühesugune garantiiaeg, siis ei või sellest järeldada, et kõik vastuvõtjatüübid on ühesuguse töökindlusega.

Tehnilise sisu omandab see termin ainult sel juhul, kui koos garantiiajaga anname ka garantiitõenäosuse väärtuse. Selgitame seda näitega. Oletame, et meil on tegemist elektronlambiga. Kuivõrd hoolikalt ei ole nad ka konstrueeritud ja valmistatud, ükski spetsialist ei julge lubada, ei või garanteerida, et näiteks miljon elektronlampi tõrgeteta töötaksid tuhande tunni jooksul. Mitmesugustel konstruktiivsetel, tehnoloogilistel ja ka ekspluatatsioonilistel põhjustel langeb teatud osa (heade lampide puhul väike osa) rivist välja. Spetsialist võib garanteerida, et mitte rohkem kui teatud kindel protsent elektronlampe langeb garantiiaja jooksul rivist välja, teiste sõnadega, teatud kindel osa elektronlampe jääb pärast garantiiaja möödumist töövõimeliseks.

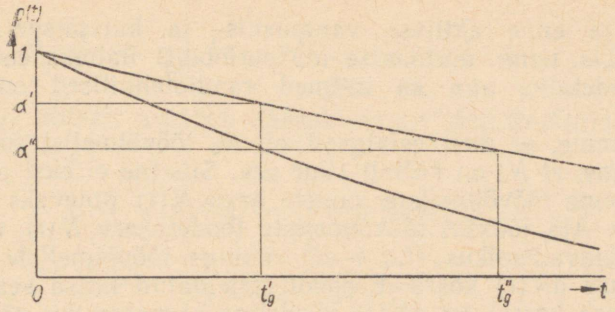
Tähistame garantiiaja tähega t_g. Oletame, et N_0 vaadeldavast elektronlambist jäi pärast garantiiaja möödumist töövõimeliseks $N(t_g)$ lampi. Küllalt suure N_0 puhul kujutab jagatis

$$\frac{N(t_g)}{N_0}$$

tõenäosust, et garantiiaja t_k möödumisel on elektronlamp töövõimeline.

Matemaatiliselt võime kirjutada, et

$$p(t_g) = \alpha, \qquad (1.1.15)$$



Joon. 1.1.6. Garantiiaja t_g ja garantiitõenäosuse graafik

kus t_g on garantiiaeg ja α garantiitõenäosus. Avaldis väidab, et tõenäosus, et garantiiaja jooksul ei teki tõrget, on α $(0 < \alpha < 1)$.

Konstantse garantiiaja puhul on toode seda tõrketum, mida suurem on garantiitõenäosus (vt. joon. 1.1.6). Kindla garantiitõenäosuse juures on tõrketum see toode, mille garantiiaeg on pikem.

1.2. Tõrketu tööaja eksponent- ja normaaljaotus

Toote tõrge tekib juhuslikul ajamomendil ning tõrketu tööaeg on juhuslik muutuja. Nagu me teame tõenäosusteooriast, on juhuslik muutuja antud, kui me teame neid väärtusi, mida ta võib omada, ja tõenäosust, millega ta ühe või teise neist väärtustest võtab. Teiste sõnadega, juhuslik muutuja on antud, kui me teame nn. jaotusseadusi. Erinevate toodete, näiteks mehaaniliste seadmete ja elektroonikaaparatuuri jaoks võivad need jaotusseadmed olla ja ongi erinevad. Kuid suure toodeteklassi jaoks on kogemused (ja muidugi ka spetsiaalsed katsed) näidanud, et tõrgete tekkimises valitsevad äärmiselt lihtsad seaduspärasused: keskmiselt tekib seda rohkem tõrkeid, mida suurem on töövõimeliste vaatlusaluste või katsetatavate toodete arv ning mida suurem on ajavahemik, mille vältel tõrkeid registreeritakse. Selliste omadustega toodeteklassi kuulub (teatud lisatingimustel, mida käsitletakse järgmises peatükis ning mis seisnevad selles, et detaile vaadeldakse pärast sissetöötamisperioodi lõppe-

mist ja enne aktiivse vananemis- ja kulumisperioodi algust, s. t. nn. normaalse töö perioodil) näiteks enamik raadiodetaile, aga ka mitmed raadiotehnilised süsteemid.

Oletame, et meil esialgselt oli N_0 töövõimelist toodet. Eeldame, et N_0 on küllalt suur arv. Siis me ei eksi palju, kui loeme töövõimeliste toodete arvu $N(t)$ pidevaks suuruseks. Aja jooksul töövõimeliste toodete arv $N(t)$ väheneb. Ajavahemikus $(t, t + \mathrm{d}t)$ muutus töövõimeliste toodete arv $\mathrm{d}N(t)$ võrra. Eespool kirjeldatud lihtsa seaduspärasuse korral on $\mathrm{d}N(t)$ võrdeline ajavahemiku vältuse $\mathrm{d}t$ ja ajamomendiks t töövõimeliste toodete arvu $N(t)$ korrutisega, niisiis

$$\mathrm{d}N \sim -N(t)\,\mathrm{d}t.$$

Tähistades konstantse võrdelisusteguri tähega λ, saame:

$$\mathrm{d}N = -\lambda N(t)\,\mathrm{d}t.$$

Integreerides eelnevat avaldist 0-st kuni t-ni, saame:

$$\int_0^t \frac{\mathrm{d}N}{N(t)} = -\int_0^t \lambda\,\mathrm{d}t;$$

siit leiame:

$$\ln N(t) - \ln N(0) = -\lambda t.$$

Kuid

$$N(0) = N_0$$

ja

$$\ln \frac{N(t)}{N_0} = -\lambda t.$$

Potentseerides saame avaldise

$$\frac{N(t)}{N_0} = \exp\,[-\lambda t].$$

Kuid küllalt suure N_0 puhul on jagatis võrduse vasakul poolel ligikaudu võrdne tõrketu töö tõenäosusega ajavahemikus 0-st t-ni. Niisiis

$$p(t) = \exp\,[-\lambda t]. \qquad (1.2.1)$$

Võrreldes saadud avaldist $p(t)$ avaldisega üldjuhul (1.1.11), näeme, et võrdelisusteguriks on tõrkeintensiivsus, kusjuures praegustel tingimustel on tõrkeintensiivsus konstantne.

Leiame tõrkesageduse:

$$f(t) = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}[1 - p(t)] = \lambda \exp[-\lambda t]. \quad (1.2.2)$$

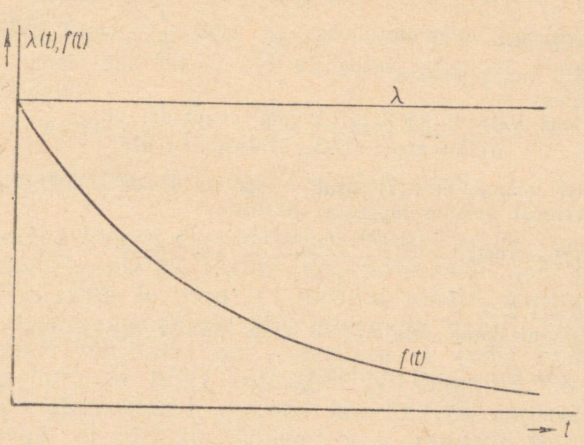
Eriti lihtsalt avaldub käesoleval erijuhul keskmine tõrketu tööaeg:

$$t_k = \int_0^\infty p(t)\,dt = \int_0^\infty \exp[-\lambda t]\,dt =$$
$$= -\frac{1}{\lambda} \exp[-\lambda t] \Big|_0^\infty = \frac{1}{\lambda}. \quad (1.2.3)$$

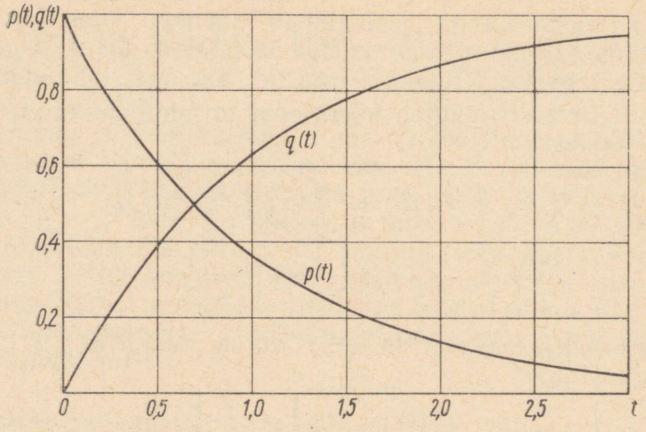
Kasutades avaldist (1.2.3), võime avaldise 1.2.1 kirjutada kujul:

$$p(t) = \exp\left[-\frac{t}{t_k}\right]. \quad (1.2.4)$$

Nagu nägime, on tõrketu tööaja eksponentjaotus määratud ainult ühe matemaatilise parameetriga, milleks on konstantne tõrkeintensiivsus λ. Sellest seisukohast on eksponentjaotus üks matemaatiliselt lihtsamaid tõenäosuse jaotusi. Joonisel 1.2.1 on näidatud tõrkesageduse $f(t)$ ja tõrkeintensiivsuse λ graafik. Joonisel 1.2.2 on näidatud tõrketu töö tõenäosus $p(t)$ ja tõrke tõenäosuse $q(t)$ sõltuvus ajast erijuhul $\lambda = 1$, s. t. funktsioonide $p(t) = \exp(-t)$ ja $q(t) = 1 - \exp(-t)$ graafikud.



Joon. 1.2.1. Tõrkeintensiivsus $\lambda(t)$ ja tõrkesagedus $f(t)$ eksponentjaotuse korral



Joon. 1. 2. 2. Tõrketu töö tõenäosus $p(t)$ ja tõrke tõenäosus $q(t)$ eksponentjaotuse korral

Graafikut 1. 2. 2 saame kasutada ka siis, kui $\lambda \neq 1$, väljendades aja keskmise tõrketu tööaja t_k suhtelistes ühikutes. Lisas I on funktsiooni $y = \exp(-x)$ tabel, mida võib kasutada praktilistes arvutustes. Neli näidet allpool selgitavad nii tabeli kasutamist kui ka eksponentjaotuse mõningaid iseärasusi.

Näide 1. 2. 1.

Ostsilloskoobi tõrkeintensiivsus on 0,002 $\frac{1}{\text{h}}$. Leida tõrketu töö tõenäosus 7 tunni jooksul.

Lahendus.

Kasutame valemit (1. 2. 1). Võime kirjutada, et

$$p(7) = \exp(-0{,}002 \cdot 7) = \exp(-0{,}014).$$

Tabelist leiame, et $p(7)$ asub 0,9900 ja 0,9802 vahel. Kasutades interpoleerimist, leiame täpsema väärtuse:

$$p(7) = 0{,}9900 - \frac{0{,}9900 - 0{,}9802}{10} \cdot 4 = 0{,}9861.$$

Näide 1. 2. 2.

Eelmise ülesande tingimustel leida, millise aja jooksul on tõrketu töö tõenäosus $p(t)$ võrdne $\frac{1}{2}$.

Lahendus.

Saame, et

$\frac{1}{2} = \exp(-0{,}002t)$. Tabelist võib leida, et funktsiooni $y =$

$= \exp(-x)$ väärtus on võrdne $\frac{1}{2}$ argumendi väärtuse juures, mis asub 0,69 ja 0,70 vahel. Kasutades interpoleerimist, leiame täpsema väärtuse:

$$0{,}69 + \frac{0{,}5016 - 0{,}5000}{0{,}5016 - 0{,}4966}(0{,}70 - 0{,}69) = 0{,}6932.$$

Edasi lahendame võrrandi

$$0{,}6932 = 0{,}002\,t,$$

kust leiame, et

$$t = 347 \text{ tundi.}$$

Näide 1.2.3.

Milline on toote tõrketu töö tõenäosus ajavahemikus, mis on võrdne selle toote keskmise tõrketu tööajaga?

Lahendus.

Kasutades valemit (1.2.4), võime kirjutada, et

$$p(t) = p(t_k) = \exp\left(-\frac{t_k}{t_k}\right) = \exp(-1) = 0{,}3679.$$

Juhime tähelepanu järeldusele viimasest vastusest: kui tooted on töötanud aja jooksul, mis võrdub keskmise tõrketu tööajaga, jääb töövõimeliseks keskmiselt 37% toodetest, aga mitte 50%, nagu ekslikult arvatakse. (See järeldus kehtib loomulikult ainult eksponentjaotuse puhul.)

Näide 1.2.4.

Raadiovastuvõtja keskmine tõrketu tööaeg $t_k = 2000$ tundi. Tasuta remont garanteeritakse poole aasta jooksul ostmise momendist. Vastuvõtja töötab keskmiselt 3 tundi päevas. Leida, mitu protsenti vastuvõtjaid ei vaja selle aja jooksul remonti.

Lahendus.

Eeldame, et poole aasta jooksul töötab iga vastuvõtja $180 \cdot 3 = 540$ tundi. Siit tõrketu töö tõenäosus selle aja jooksul valemi (1.2.1) järgi:

$$p(540) = \exp\left(-\frac{540}{2000}\right) = \exp(-0{,}27) = 0{,}7634$$

ehk ligikaudu 76% vastuvõtjaid ei vaja remonti.

Tõrketu tööaja eksponentjaotus on omane suurele toodeteklassile nende teatud nn. normaalse töö perioodil. Kuid niisama levinud on tõrketu tööaja normaaljaotus, eriti nende elementide ja süsteemide puhul, kus tõrgete tekkimise põhjuseks on elektriline ja (või) mehaaniline vananemine ja (või) kulumine. Nii kogutud eksperimentaalsed statistilised andmed kui ka teoreetiline käsitlus näitavad, et tõrketu tööaeg on vananemis- ja kulumisprotsesside puhul tihti jaotunud normaalselt. Ilmneb ka,

et nende detailide juures, mille nn. normaalse töö perioodil on tõrketu tööaja jaotus eksponentsiaalne, võib normaaljaotust kasutada tõrketu tööaja iseloomustamiseks nn. töötamise viimasel perioodil. Isegi sel juhul, kui tegelik jaotus erineb normaalsest, on vaja aproksimeerida tegelikku jaotust normaaljaotusega, kaotades küll seejuures täpsusest, aga võites vajalike matemaatiliste meetodite lihtsuses.

Normaalselt jaotunud tõrketu tööaja tõenäosustihedus $f(t)$ (tõrkesagedus) antakse avaldisega

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp - \left[\frac{(t-a)^2}{2\sigma^2} \right],$$

kus $a > 0$ ja $\sigma > 0$ on konstandid. Matemaatiliselt ei ole viimane avaldis range, kuid praktiliselt täiesti vastuvõetav. Nimelt on tõrketu tööaeg oluliselt positiivne suurus (või null), kuid normaaljaotus on määratud vahemikus $(-\infty, \infty)$. Võib veenduda, et kui konstant a on kolm või enam korda suurem kui konstant σ, siis on viga, mille me teeme, vaadeldes ainult vahemikku $0 \leqslant t < \infty$, praktilise kasutamise seisukohalt niivõrd väike, et me võime jätta selle arvestamata.

Nagu teada, on konstant a jaotuse sümmeetriatelje abstsissiks. Pole raske lahti mõtestada konstandi a konkreetset sisu. Leiame keskmise tõrketu tööaja t_k:

$$t_k = \int_0^\infty t f(t)\,dt \cong \int_{-\infty}^{\infty} t f(t)\,dt =$$

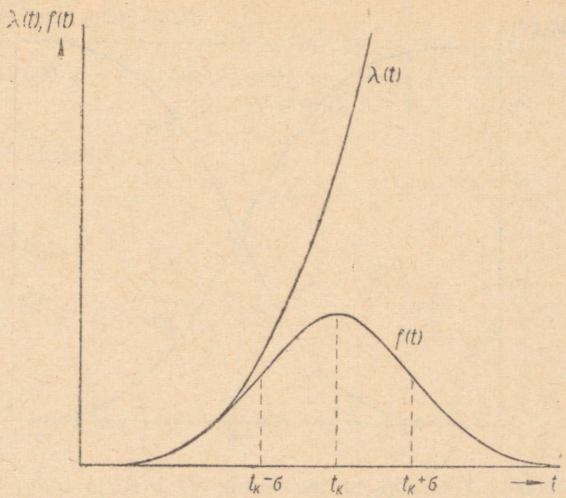
$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^\infty t \exp\left[- \frac{(t-a)^2}{2\sigma^2} \right] dt = a.$$

Niisiis võime tõenäosustiheduse $f(t)$ kirjutada kujul

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[- \frac{(t-t_k)^2}{2\sigma^2} \right]. \qquad (1.2.4)$$

σ kujutab endast tõrketu tööaja ruutkeskmist hälvet (vt. joonis 1.2.3).

Tõrke tõenäosus $q(t)$ on vastavalt valemile (1.1.5)



Joon. 1. 2. 3. Tõrkeintensiivsus $\lambda(t)$ ja tõrkesagedus $f(t)$ normaaljaotuse korral

$$q(t) = \int_0^t f(t)\,dt \cong \int_{-\infty}^t f(t)\,dt =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^t \exp\left[-\frac{(t-t_k)^2}{2\sigma^2}\right] dt,$$

ning tõrketu töö tõenäosus

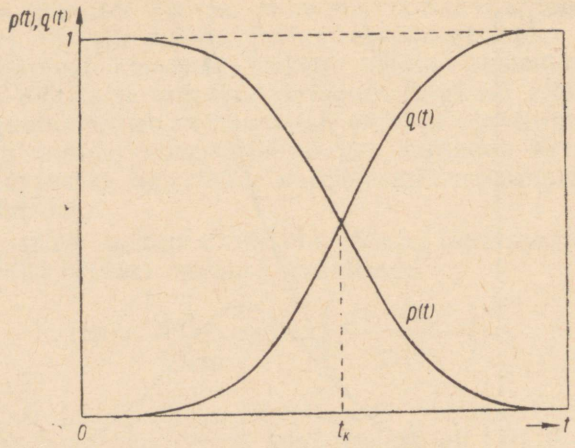
$$p(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^t \exp\left[-\frac{(t-t_k)^2}{2\sigma^2}\right] dt =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_t^\infty \exp\left[\frac{(t-t)^2}{2\sigma^2}\right] dt \qquad (1.2.5)$$

Tõrke tõenäosuse ja tõrketu töö tõenäosuse graafikud on joonisel 1. 2. 4. Tõrkeintensiivsuse $\lambda(t)$ leiame valemist (1. 1. 12):

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{p(t)}$$

($\lambda(t)$ graafik vt. jooniselt 1. 2. 3).



Joon. 1. 2. 4. Tõrketu töö tõenäosus $p(t)$ ja tõrke tõenäosus $q(t)$ normaaljaotuse korral

Vaatame, millised on eksponent- ja normaaljaotuse iseloomulikud erinevused. Normaaljaotuse puhul on tõrke tekkimise momendid hajunud keskmise tõrketu tööaja t_k ümber, kusjuures poolte toodete tööaeg on lühem kui t_k ja pooltel suurem kui t_k. Eksponentjaotuse puhul oli 63% toodetest tõrketu tööaeg lühem kui t_k ja 37% toodetest pikem kui t_k. Kui tõrketu tööaeg on jaotunud normaalselt, siis t_k-st erinevaid tõrketuid tööaegu on seda vähem, mida rohkem erineb tööaja väärtus keskmise tõrketu tööaja väärtusest.

Vaatleme kahte näidet, mis aitavad paremini mõista normaaljaotuse iseärasusi.

Näide 1. 2. 5.

Olgu toote tõrketu tööaeg jaotunud normaalselt, keskmine tõrketu tööaeg $t_k = 10\,000$ h ja ruutkeskmine hälve $\sigma = 1000$ h. Leida, mitmel protsendil toodetest on tõrketu tööaeg 12 000 ja 12 500 tunni vahel, teiste sõnadega, mitmel protsendil toodetest tekib tõrge selles ajavahemikus.

Lahendus.

Tõenäosus, et tõrketu tööaeg on vahemikus $(t,\ t + \mathrm{d}t)$, on, nagu teada, $f(t)\,\mathrm{d}t$. Tõenäosus, et tõrketu tööaeg on vahemikus $(t_1,\ t_2)$, avaldub integraalina

$$P\{t_1 \leqslant \tau < t_2\} = \int_{t_1}^{t_2} f(t)\,\mathrm{d}t$$

või meie konkreetsel juhul

$$P\{12\,000 \leqslant \tau < 12\,500\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma} \int_{t_1}^{t_2} \exp\left[-\frac{(t-t_k)^2}{2\sigma^2} \right] \mathrm{d}t.$$

Kasutades asendust

$$Z = \frac{t - t_k}{\sigma}; \quad Z_1 = \frac{t_1 - t_k}{\sigma}, \quad Z_2 = \frac{t_2 - t_k}{\sigma},$$

võime leida, et

$$P\{12\,000 \leqslant \tau < 12\,500\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{Z_1}^{Z_2} \exp\left[-\frac{Z^2}{2} \right] \mathrm{d}z =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Z_2} \exp\left[-\frac{z^2}{2} \right] \mathrm{d}z - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Z_1} \exp\left[-\frac{z^2}{2} \right] \mathrm{d}z =$$

$$= \Phi(Z_2) - \Phi(Z_1) = \Phi\left(\frac{t_2 - t_k}{\sigma} \right) - \Phi\left(\frac{t_1 - t_k}{\sigma} \right) =$$

$$= \Phi\left(\frac{12\,500 - 10\,000}{1000} \right) - \Phi\left(\frac{12\,000 - 10\,000}{1000} \right) =$$

$$= \Phi(2{,}5) - \Phi(2),$$

kus $\Phi(z)$ on nn. vigade ehk Laplace'i integraal, mille väärtused võib leida tabelist lisas II. Kasutades tabelit, leiame:

$$\Phi(2{,}5) - \Phi(2) = 0{,}9938 - 0{,}9772 = 0{,}0166 = 1{,}66\%.$$

Näeme, et ainult väikesel osal (1,66%) esialgselt töövõimelistest toodetest on tõrketu tööaeg 12 000 tunni ja 12 500 tunni vahel.

Näide 1.2.6.

Olgu tõrketu tööaeg jaotunud normaalselt, $t_k = 10\,000$ h ja $\sigma = 1000$ h. Milline on (tinglik) tõenäosus, et tõrge tekib vahemikus 12 000 ... 12 500 h eeldusel, et selle ajavahemiku algul oli toode töövõimeline.

Lahendus.

Seisnegu sündmus A toote tõrketus töötamises vahemikus 0 ... 12 000 h ja sündmus B tõrke tekkimises tootes vahemikus 12 000 ... 12 500 h. Sündmust B võime vaadelda kui sündmuste A ja B korrutist. Tõenäosuste korrutamise teoreemi järgi

$$P(B) = P(A)P(B/A),$$

kus $P(B)$ on sündmuse B tõenäosus, $P(A)$ sündmuse A tõenäosus ja $P(B/A)$ sündmuse B tinglik tõenäosus eeldusel, et toimus sündmus A. Siit

$$P(B/A) = \frac{P(B)}{P(A)}.$$

Tõenäosuse $P(B)$, et vahemikus 12 000 ... 12 500 h toimub tõrge, leidsime eelmises näites ja see on 0,0166. Tõenäosuse, et vahemikus 0 ... 12 000 h tõrget ei toimu, leiame valemiga

$$P(A) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{12\,000}^{\infty} \exp\left[\frac{(t-10\,000)^2}{2(1000)^2}\right] dt =$$

$$= 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{12\,000} \exp\left[-\frac{(t-10\,000)^2}{2(1000)^2}\right] dt.$$

Kuid viimase integraali väärtus on meil leitud eelmises näites ja

$$P(A) = 1 - 0{,}9772 = 0{,}0228.$$

Siit

$$P(B/A) = \frac{0{,}0166}{0{,}0228} = 0{,}728 = 72{,}8\%.$$

Võrdleme nende kahe näite tulemusi. Nägime, et ajavahemikus 12 000 ... 12 500 h tekib tõrge 1,66% ajamomendiks $t = 0$ töövõimelistest toodetest ja 72,8% neist toodetest, mis olid töövõimelised ajamomendiks $t = 12\,000$ h. Kui tuletame meelde, et tõrkeintensiivsust $\lambda(t)$ võib mõista kui tõrke tinglikku tõenäosust vahemikus $(t,\ t+1)$ eeldusel, et ajamomendil t oli toode töövõimelises seisundis, selgitab viimane näide tõrkeintensiivsuse järsku kasvu keskmise tõrketu tööaja ületamisel.

1.3. Süsteemi tõrketusparameetrite määramine elementide tõrketusparameetrite kaudu

Elektroonikaaparatuuri väljatöötamisel kerkib insenerkonstruktori ette järgmine probleem: on teada, millistest elementidest süsteem koosneb; elementide tõrketusparameetrite väärtused on samuti teada; leida süsteemi tõrketusparameetrite väärtused.

Süsteemi ja elementi käsitleme töökindlusõpetuse seisukohalt. Mingi konkreetne toode võib olla oma detailide suhtes süsteemiks, kuid mõne suurema toote suhtes, mille koostisosaks ta omakorda on, elemendiks. Konkreetsuse mõttes samastame käesolevas paragrahvis elemendi raadiodetailiga ning süsteemi all mõistame mingiks kindlaks otstarbeks määratud iseseisvat aparatuuri, näiteks raadiovastuvõtjat, televiisorit, ostsilloskoopi, universaalset toiteallikat jne. Kuid resultaadid, mis me sellise konkretiseeritud juhu jaoks saame, on kehtivad ka siis, kui me näiteks süsteemi all mõistame raadiolo-

kaatorit, aga elementide all tema üksikuid blokke, mis omakorda koosnevad paljudest detailidest.

Järgnevate arutluste eelduseks on järgmine väide: süsteem kaotab oma töövõime, kui kas või ükski tema elementidest kaotab töövõime. See eeldus nõuab mõningat täpsustamist. Esiteks tuleks meil välja selgitada nn. mitteolulised elemendid, mille tõrge ei mõjuta süsteemi töövõimet. Siia kuulub näiteks signaallamp mõõteriista esiplaanil, mille läbipõlemine mõjutab küll mõõteriista käsitsemise hõlpsust, kuid ei takista mõõteriista kasutamist mõõtmisteks. Seega tuleb mitteolulised elemendid vaatluse alt välja jätta. Teiseks loeme, et süsteemis ei ole kasutatud nn. reserveerimist, jättes selle mõiste selgitamise edaspidiseks. Ning lõpuks, me vaatleme mittetaastatavaid süsteeme, kuigi hiljem näeme, et selles paragrahvis leitud seostele võib anda ka teise, teatud mõttes laiema sisu.

Olgu süsteemis n elementi. Seisnegu sündmus B_i selles, et element numbriga i on töövõimeline $(1 \leqslant i \leqslant n)$. Eeldatakse, et ükskõik missuguse elemendi tõrge kutsub esile ka süsteemi tõrke, kusjuures elementide tõrked tekivad üksteisest sõltumatult. Tähistagu A sündmust, mis seisneb selles, et süsteem on töövõimeline. Süsteem on töövõimeline, kui kõik tema n elementi on töövõimelised. Siit saame, et sündmus A peab olema sündmuste B_i korrutis:

$$A = B_1 B_2 \ldots B_n = \prod_{i=1}^{n} B_i.$$

Meid huvitab sündmuse A tõenäosus $P(A)$ sõltuvalt sündmuste B_i tõenäosustest $P(B_i)$. Tõenäosusteooriast tuntud tõenäosuste korrutamise teoreemi põhjal

$$P(A) = P(B_1)P(B_2) \ldots P(B_n) = \prod_{i=1}^{n} P(B_i).$$

Kuid tõenäosus $P(B_i)$, et element numbriga i on töövõimeline, on samaväärne tõenäosusega, et selles elemendis ei ole tekkinud tõrget, teiste sõnadega i-nda elemendi tõrketu töö tõenäosusega. Analoogiliselt kujutab $P(A)$ süsteemi tõrketu töö tõenäosust. Kuid nagu me nägime eespool, sõltub elemendi tõrketu töö tõenäosus ajast, olles aja kahanev funktsioon. Järelikult sõltub ka süsteemi tõrketu töö tõenäosus ajast. Me võime kirjutada, et

$$P(t) = p_1(t)p_2(t) \dots p_n(t) = \prod_{i=1}^{n} p_i(t), \quad (1.3.1)$$

kus $P(t)$ on süsteemi tõrketu töö tõenäosus, $p_i(t)$ aga i-nda elemendi tõrketu töö tõenäosus.

Me saime suhteliselt lihtsa tulemuse, mida võib sõnastada järgmiselt: süsteemi tõrketu töö tõenäosus võrdub elementide tõrketu töö tõenäosuste korrutisega. Kuid praktilisteks arvutusteks on see valem ebaotstarbekohane: valemi parema poole leidmine juhul, kui süsteem sisaldab sadu ja tuhandeid elemente, on väga aegaviitev. Teiseks tuuakse käsiraamatutes detailide tõrketusparameetritest harilikult tõrkeintensiivsus, aga mitte tõrketu töö tõenäosus. Sellepärast teisendame viimast valemit, kasutades juba leitud seost (vt. 1.1.11):

$$p_i(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda_i(t)\,dt\right],$$

kus $\lambda_i(t)$ on elemendi numbriga i tõrkeintensiivsus. Edasi leiame, et

$$P(t) = \prod_{i=1}^{n} \exp\left[-\int_0^t \lambda_i(t)\,dt\right] = \exp\left[-\sum_{i=1}^{n}\int_0^t \lambda_i(t)\,dt\right] =$$

$$= \exp\left[-\int_0^t \left[\sum_{i=1}^{n} \lambda_i(t)\right] dt\right] = \exp\left[-\int_0^t \Lambda(t)\,dt\right],$$

kus me tähistasime

$$\sum_{i=1}^{n} \lambda_i(t) = \Lambda(t). \quad (1.3.2)$$

$\Lambda(t)$ kujutab endast elementide tõrkeintensiivsuste summat. Kuid kirjutades süsteemi tõrketu töö tõenäosuse $P(t)$ kujul

$$P(t) = \exp\left[-\int_0^t \Lambda(t)\,dt\right], \quad (1.3.3)$$

võime veenduda, et oma olemuselt on $\Lambda(t)$ süsteemi tõrkeintensiivsus.

Saime väga lihtsa seose: süsteemi tõrkeintensiivsus võrdub tema elementide tõrkeintensiivsuste summaga. Kuna meil on siin tegemist liitmisega, sobib see seos hästi praktiliseks arvutamiseks.

Siiani pole me teinud mingeid kitsendusi tõrkeintensiivsuse sõltuvuse kohta ajast ja valemid (1. 3. 2) ja (1. 3. 3) on selles mõttes üldised. Kuid nagu nägime paragrahvis 1. 2, on tõrketu tööaeg väga tihti jaotunud eksponentsiaalselt, kust järeldub, et tõrkeintensiivsus on konstantne suurus:

$$\lambda_i(t) = \lambda_i = \text{const.}$$

Nüüd saame valemites (1. 3. 2) ja (1. 3. 3) teha tunduvaid lihtsustusi. Valemi (1. 3. 2) asemel me võime kirjutada:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i, \qquad (1.3.4)$$

kus Λ on süsteemi konstantne tõrkeintensiivsus. Valem (1. 3. 3) teisendub valemiks

$$P(t) = \exp[-\Lambda t]. \qquad (1.3.5)$$

Näeme, et ka süsteemi tõrketu tööaeg on jaotunud eksponentsiaalselt.

Kasutame valemeid (1. 3. 4) ja (1. 3. 5) süsteemi tõrketu töö tõenäosuse sõltuvuse väljaselgitamiseks elementide (detailide) arvust. Määrame detailide keskmise tõrkeintensiivsuse järgmiselt:

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \lambda_i}{n}.$$

Siis võime kirjutada, et

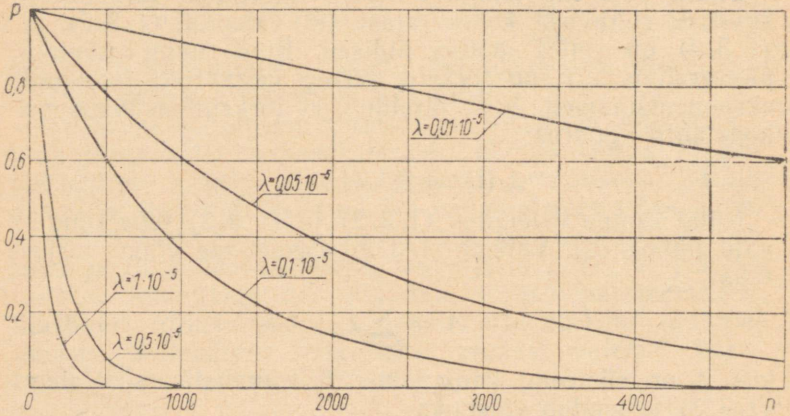
$$\sum_{i=1}^{n} \lambda_i = n\bar{\lambda}$$

ja

$$P(t) = \exp[-n\bar{\lambda}t].$$

Viimast valemit illustreerib joonis 1. 3. 1, kus on näidatud tõrketu töö tõenäosus $P(1000)$ tuhande tunni jooksul sõltuvalt elementide arvust n erinevate keskmiste tõrkeintensiivsuste $\bar{\lambda}$ juures. Võime täheldada tõrketu töö tõenäosuse tunduvat vähenemist detailide arvu suurenemisel.

Detailide arvu süsteemis (mis on süsteemi üks keerukusnäitajaid) võib vaadelda süsteemi ühe töökindlusparameetrina (õigemini tõrketusparameetrina).



Joon. 1.3.1. Tõrketu töö tõenäosus $P(1000)$ 1000 tunni jooksul sõltuvalt elementide arvust n erinevate keskmiste tõrkeintensiivsuste λ puhul

Raadiovastuvõtjate, televiisorite, raadioelektronmõõteriistade ning terve rea teiste toodete kõige enam kasutatavaks töökindlusparameetriks on keskmine tõrketu tööaeg T_k. (Süsteemi parameetrite tähistamiseks kasutame suuri tähti.) Väljendame T_k detailide tõrkeintensiivsuste λ_i kaudu. Eksponentsiaalse tööaja jaotuse korral

$$T_k = \frac{1}{\Lambda}, \qquad (1.3.6)$$

kus Λ on süsteemi tõrkeintensiivsus. Edasi võime kirjutada, et

$$T_k = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \lambda_i}. \qquad (1.3.7)$$

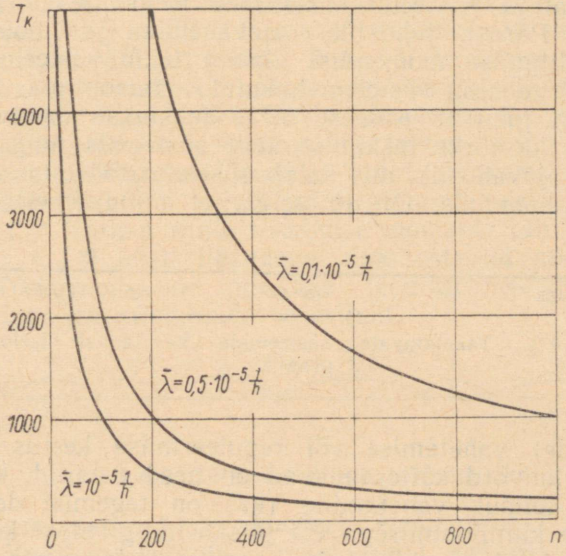
Kui kasutada detailide keskmise tõrkeintensiivsuse $\bar{\lambda}$ mõistet, saame, et

$$T_k = \frac{1}{n\bar{\lambda}} \sim \frac{1}{n}, \qquad (1.3.8)$$

s. t. süsteemi keskmine tõrketu tööaeg on pöördvõrdeline tema detailide arvuga. Joonisel 1.3.2 on see sõltuvus

näidatud kolme keskmise tõrkeintensiivsuse ($\bar{\lambda}_1 = 10^{-5}$, $\bar{\lambda}_2 = 0{,}5 \cdot 10^{-5}$ ja $\bar{\lambda}_3 = 0{,}1 \cdot 10^{-5}$) jaoks.

Valemit (1. 3. 8) võib kasutada projekteeritava süsteemi keskmise tõrketu tööaja orienteerivaks määramiseks, kui on teada tema ligikaudne detailide arv, aga ei ole teada konkreetsete detailide tüüp ega nende elektriline ja soojuslik koormus.



Joon. 1. 3. 2. Süsteemi keskmise tõrketu tööaja T_k sõltuvus detailide arvust n, erinevate keskmiste tõrkeintensiivsuste korral

Rõhutame veel kord triviaalset, kuid sagedasti unustatavat järeldust eespool toodud seostest: mida keerulisem on süsteem, seda vähem töökindel ta on (kui ei ole rakendatud spetsiaalseid abinõusid vajaliku töökindluse tagamiseks).

Näide 1. 3. 1.
Väljatöötatavas lampvoltmeetris on ligikaudu 200 detaili, kusjuures analoogilise aparatuuri ja analoogiliste detailide jaoks võib

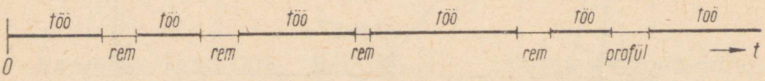
lugeda, et $\bar{\lambda} = 0{,}625 \cdot 10^{-5} \frac{1}{h}$. Milline keskmine tõrketu tööaeg on sellel lampvoltmeetril?

Lahendus. Kasutame valemit (1.3.8):

$$T_k = \frac{1}{n\bar{\lambda}} = \frac{1}{0{,}625 \cdot 10^{-5} 200} = \frac{1{,}6 \cdot 10^5}{200} = 800 \text{ tundi.}$$

1.4. Taastatavate süsteemide tõrketusparameetrid

Taastatava süsteemi kasutamist iseloomustab graafik 1.4.1. Pärast juhusliku ajavahemiku τ möödumist (sisselülitamise momendist alates) tekib süsteemis esimene tõrge ning süsteemi hakatakse remontima. Samuti nagu on juhuslik esimese tõrke tekkimise moment, on juhuslik ka tõrke tekkimise koht süsteemis ning järelikult ka ajavahemik, mis kulub süsteemi töövõime taastamiseks-remondiks. On ju selge, et mingite elementide



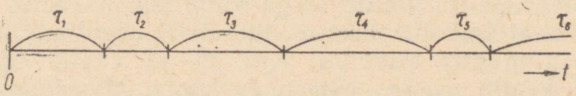
Joon. 1.4.1. Taastatavate süsteemide kasutamist iseloomustav graafik

(detailide) vahetamise või reguleerimise kestus sõltub sellest, kuivõrd kättesaadavad on need detailid, kuivõrd kiiresti toimub vahetamine (kas on tegemist detailide lahti- ja kinnijootmisega või piisab mingi ploki kontaktpesast väljatõmbamisest ja uuega asendamisest), milliseid seadmeid vajatakse reguleerimiseks, kaua kestab reguleerimisseadmete ülesseadmine, kui kaua kestab reguleerimine jne. Pärast remonti töötab süsteem mingi juhusliku ajavahemiku τ_2 vältel, tekib teine tõrge, toimub teine juhusliku kestusega remont jne. Paljudel süsteemidel on teatud kindla arvu töötundide möödumise järel või ka teatud perioodilisusega (kord nädalas, kuus, pooles aastas jne.) ette nähtud üht või teist laadi profülaktilised tööd (siia kuulub ka mõõteriistade perioodiline kontroll). Profülaktilisi töid alustatakse sõltumatult sellest, kas täheldati tõrget või mitte.

Kui meid huvitab süsteemi kasutamine ainult sisselülitamise momendist esimese tõrkeni, võime kasutada neid

mõisteid ja neid matemaatilisi seoseid, millega tutvusime kolmes eelnevas paragrahvis. Kuid sellise protsessi vaatlemisel, kus süsteemi töötamine vaheldub remondiga, ei ole need mõisted ja seosed enam küllaldased. Veel enam, taastatavate süsteemide vaatlemisel osutub vajalikuks hoopis uus matemaatiline lähenemisviis. Vajaliku matemaatilise aparaadi annab meie käsutusse tõenäosusteooria uus haru, mis kannab nimetust massilise teenindamise teooria.

Pöördume tagasi joonise 1. 4. 1 juurde. Käesolevas paragrahvis ei huvita meid profülaktiliste töödega seotud küsimused ning seetõttu loeme, et vaadeldavas süsteemis profülaktilisi töid ei toimu. Remondi keskmise kestuse loeme praegu tunduvalt väiksemaks keskmisest ajavahemikust kahe tõrke vahel. Teiste sõnadega, me eeldame, et süsteemi töövõime taastamine toimub silmapilkselt. Kui me kõrvaldaksime joonisel 1. 4. 1 süsteemi remonti ja profülaktilisi töid kujutavad sirglõigud, saaksime joonise 1. 4. 2. Tõrked, mille tekkimise momente tähistatakse joonisel 1. 4. 2 püstkriipsudega, moodustavad nn. tõrkevoo. Tõrkevoog on massilise teenindamise teoorias vaadeldava nn. sündmustevoo erijuht.



Joon. 1. 4. 2. Tõrkevoo mõiste selgitamiseks

Süsteem (aparatuur) koosneb elementidest (detailidest). Vaatleme mingit kindlat tüüpi detaili (takistit, kondensaatorit, elektronlampi, trasistori jne.) mingis kindlas positsioonis süsteemi elektrilises skeemis. Juhuslikel ajamomentidel tekib selle detaili tõrge, ta asendatakse sama tüüpi uue detailiga, tekib järgmine tõrge jne., ühesõnaga, tekib mingi kindla positsiooniga detaili tõrkevoog. Me eeldame, et iga detaili tõrge kutsub esile ka süsteemi tõrke, nagu see reserveerimata süsteemides ka tegelikult on. Teistes positsioonides asuvate detailide tõrked moodustavad samuti tõrkevood, kusjuures detailide tõrkevood liitudes moodustavad süsteemi tõrkevoo. Igat detailitüüpi iseloomustatakse selliste parameetritega nagu tõrketu töö tõenäosus, tõrkeintensiivsus, tõrkesagedus. Meid huvitab:

a) kuidas iseloomustada detailide tõrkevoogu detailide tõrketusparameetrite abil,

b) kuidas on seotud süsteemi tõrkevoog ja tema detailide tõrkevood.

Vaatleme mingis kindlas positsioonis asuva detaili tõrkevoogu. Tähistame $\mu(t)$-ga ajavahemikus $(0, t)$ toimunud tõrgete arvu. $\mu(t)$ võib omada ainult positiivseid täisarvulisi väärtusi ja väärtust 0; ta on aja mittekahanev funktsioon. Ajavahemikus $0 \ldots t$ toimunud tõrgete arv on juhuslik suurus, kuna tõrked ise toimuvad juhuslikel ajamomentidel. Kuid meil on võimalus leida ajavahemikus $0 \ldots t$ toimunud tõrgete arvu $\mu(t)$ keskmine väärtus $m(t)$ näiteks sel teel, et me määrame N süsteemi mingis kindlas ühesuguses positsioonis asuvate detailide tõrgete üldarvu ning jagame saadud arvu vaadeldavate süsteemide arvuga N. Küllalt suure süsteemide arvu N puhul võime määrata $m(t)$ igasuguse meile vajaliku täpsusega. Samuti võime lugeda $m(t)$ pidevaks mittekahanevaks aja funktsiooniks.

Me arvestame, et tõrked tekivad praktiliselt ühekaupa, teiste sõnadega, kindlal ajamomendil võib olla ainult üks tõrge. Kui vaatleme kindlas positsioonis asuvat detaili ja eeldame, et järgmine tõrge võib tekkida alles teatud minimaalse ajavahemiku möödumisel eelmisest tõrkest, on see tingimus täidetud. Kui me ei vaatle sõltuvaid tõrkeid, kehtib see ka süsteemide kohta. Massilise teenindamise teoorias nimetatakse selliseid vooge ordinaarseteks.

Vahemikus $(0, t)$ toimub keskmiselt $m(t)$ tõrget, vahemikus $(0, t + \Delta t)$ keskmiselt $m(t + \Delta t)$ tõrget. Järelikult vahemikus $(t, t + \Delta t)$ toimub keskmiselt $m(t + \Delta t) - m(t)$ tõrget. Ühes ajaühikus (kui see ajaühik on küllalt väike) alates momendist t toimub keskmiselt

$$\frac{m(t + \Delta t) - m(t)}{\Delta t}$$

tõrget. Täpsema tulemuse saamiseks peame lähendama Δt nullile. Suurust

$$\lambda^*(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{m(t + \Delta t) - m(t)}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}m(t)}{\mathrm{d}t} \qquad (1.4.1)$$

nimetatakse tõrkevoo parameetriks.

Me võime tõrkevoo parameetrile anda veel teise füüsikalise tõlgenduse. Vaatleme N ühesuguses positsioonis asuvat detaili ühesuguses N süsteemis. Toimugu ajavahemikus $(t, t+\Delta t)$ kokku ΔN tõrget. Kui Δt on küllalt väike, võib selle aja jooksul igas detailis tekkida mitte rohkem kui üks tõrge. Siit järeldub, et ΔN on ka tõrkunud detailide arv ning

$$\frac{\Delta N}{N} = \Delta q$$

on detaili tõrke tõenäosus selles ajavahemikus. Teisest küljest, tõrgete keskmine arv selles ajavahemikus $m(t+\Delta t) - m(t)$ on samuti $\frac{\Delta N}{N}$. Järelikult

$$m(t+\Delta t) - m(t) = \frac{\Delta N}{N},$$

$$m(t+\Delta t) - m(t) = \Delta q$$

ning

$$\lambda^*(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{m(t+\Delta t) - m(t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}. \tag{1.4.2}$$

Siit on näha, et tõrkevoo parameetrit momendil t võib mõista kui tõrke tekkimise tõenäosust ajaühikus momendil t.

Üldjuhul sõltub tõrkevoo parameeter $\lambda^*(t)$ ajast t. Vaatleme l tõrke tekkimise tõenäosust ajavahemikus $(t, t+t')$. Eespool kirjeldatud sündmuse tõenäosus sõltub kolmest suurusest: tõrgete arvust l, vaadeldava ajavahemiku algmomendist t ja ajavahemiku kestusest t'. Kui meid huvitab mingi kindla arvu l tõrke tekkimise tõenäosus ajavahemikus kestusega t', siis reeglina on see tõenäosus erinev sõltuvalt sellest, millisest ajamomendist t me loeme ajavahemiku algust.

Põhjusel, mis saab meile selgeks veidi hiljem, on töökindlusõpetuse praktilistel rakendustel eriline osa nn. statsionaarsetel voogudel. Statsionaarseks nimetame voogu, mille puhul l tõrke tekkimise tõenäosus ajavahemikus $(t, t+t')$ sõltub ainult tõrgete arvust l ja ajavahemiku kestusest t' ega sõltu ajavahemiku algmomendist t. Vähem rangelt võiksime seda mõtet väljendada järgmiselt: tõrkevoog on statsionaarne, kui tema tõenäosuslik režiim ei sõltu ajast, kui mingi kindla arvu tõrke sattu-

mine kindla pikkusega lõiku ajateljel sõltub ainult selle lõigu pikkusest ega sõltu sellest, kus see lõik ajateljel asetseb. Veendume, et statsionaarse voo korral on tõrkevoo parameeter konstantne suurus:

$$\lambda^*(t) = \lambda^* = \text{const.}$$

Tähtsaks, praktikas sageli kasutatavaks tõrkevoogu iseloomustavaks suuruseks on keskmine tõrgetevaheline tööaeg t_k^*. Keskmine tõrgetevaheline tööaeg määratakse üldjuhul valemiga

$$t_k^* = \frac{t'}{m(t+t') - m(t)}, \qquad (1.4.3)$$

kus parema poole lugeja väljendab vaadeldava ajavahemiku kestust, nimetaja aga keskmist tõrgete arvu selles vahemikus. Kui on tegemist statsionaarse vooga, siis valemi (1.4.1) põhjal

$$\lambda^* = \frac{m(t+t') - m(t)}{t'} \qquad (1.4.4)$$

ja

$$m(t+t') - m(t) = \lambda^* t'. \qquad (1.4.5)$$

Asetades avaldise (1.4.5) avaldisse (1.4.3) leiame, et

$$t_k^* = \frac{t'}{\lambda^* t'} = \frac{1}{\lambda^*}, \qquad (1.4.6)$$

teiste sõnadega, keskmine tõrgetevaheline tööaeg on pöördvõrdeline tõrkevoo parameetriga.

Siiani ei püüdnud me tõrkevoogu iseloomustavaid suurusi λ^* ja t_k^* siduda selle detaili tõrketusparameetritega, mille igakordne väljavahetamine pärast tõrke tekkimist moodustab tõrkevoo. Leiame nüüd ühe lihtsa ja tähtsa seose. Olgu detaili keskmine tõrketu tööaeg t_k. (Juhime tähelepanu sellele, et tõrkevoogu iseloomustavaid suurusi tähistame tärnikesega*.) Väljendame keskmise tõrgete arvu $m(t)$ vahemikus $(0, t)$ detaili keskmise tõrketu tööaja kaudu. Iga t väärtuse puhul on ligikaudu

$$m(t) = \frac{t}{t_k},$$

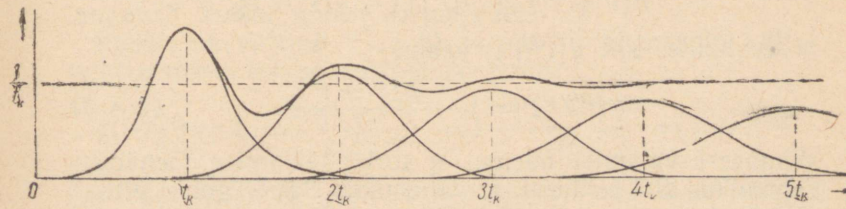
kusjuures see võrdsus on seda täpsem, mida suurem on t. Küllalt suure t korral võime lugeda, et meil on tegemist

täpse võrdsusega. Leiame valemi (1. 4. 1) abil tõrkevoo parameetri küllalt suurte t väärtuste jaoks:

$$\lambda^*(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{t}{t_k}\right) = \frac{1}{t_k}. \qquad (1.4.7)$$

Küllalt suurte t väärtuste juures on tõrkevoo parameeter konstantne ja pöördvõrdeline detaili keskmise tõrketu tööajaga, sõltumata sellest, milline on selle detaili tõrketu tööaja jaotus. Võime väljendada seda ka teisiti: küllalt pika aja (võrreldes detaili keskmise tõrketu tööajaga t_k) möödumisel muutub iga tõrkevoog statsionaarseks, sõltumata detaili tõrketu tööaja jaotusest.

Olgu detaili tõrketu tööaeg jaotunud normaalselt keskmise väärtusega t_k ja ruutkeskmise hälbega σ_{t_k}, kusjuures $\sigma_{t_k} \ll t_k$ (vt. joon. 1. 2. 3). See tähendab, et esimesed tõrked tekivad peaasjalikult ajamomendi t_k läheduses, kusjuures tõrke tekkimise momendid on hajunud seda rohkem, mida suurem on ruutkeskmine hälve σ_{t_k}. Järelikult on tõrkevoog alguses (vahemikus $0 \ldots t_k$) oluliselt ebastatsionaarne. Teine tõrge tekib ajamomendi $2\,t_k$ läheduses, kusjuures tõrke tekkimise momendi hajumine on suurem kui esimese tõrke puhul. Kui esimene detail hakkas tööle kindlal ajamomendil $t = 0$ ning ainult töö lõppmoment oli juhuslik, siis teise detaili jaoks on juhuslik nii töötamise algmoment, mis määratakse esimese detaili töötamise lõppmomendiga, kui ka lõppmoment. Kolmanda detaili tõrkemomendid on hajunud $3\,t_k$ ümbruses veelgi tugevamini. Kuid kui esimese, teise, kolmanda jne. detaili tõrkemomendid liituvad, jaotuvad nad järjest ühtlasemalt ning tõrkevoo parameetri graafik omandab joonisel 1. 4. 3 näidatud väheneva amplituudiga lainelise kuju, kusjuures tõrkevoo parameetri võnkumine



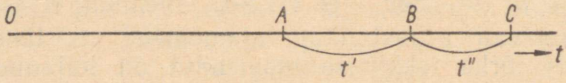
Joon. 1. 4. 3. Statsionaarse tõrkevoo tekkimise graafik

TRÜ Raamatukogu

toimub statsionaarse väärtuse $\frac{1}{t_k}$ ümber. Eespool toodud arutlustest on ka selge, et mida väiksem on detaili tõrketu tööaja ruutkeskmine hälve σ_{t_k}, seda kauem kestavad märgatavad võnkumised.

Voogu nimetatakse piiratud järelmõjuga vooks, kui ajavahemikud igasuguse kolme järjestikuse sündmuse vahel on vastastikku sõltumatud. Veendume, et mingis kindlas positsioonis asetseva detaili tõrkevoog on piiratud järelmõjuga voog. Tõepoolest, mingi detaili tõrketu tööaeg ei sõltu sellest, kui pikk oli vaadeldava detailiga väljavahetatud eelmise detaili tõrketu tööaeg.

Selgitame, kust on tulnud nimetus «piiratud järelmõjuga» voog. Vaatleme joonisel 1.4.4 näidatud skeemi.



Joon. 1.4.4. Piiratud järelmõju selgituseks

Olgu A tõrkevoo viimase tõrke tekkimise moment ja $BC = t''$ mingi vabalt võetud ajavahemik kaugusel t' pärast viimast tõrget. Tähistame $p(t)$-ga tõrketu töö tõenäosuse ajavahemikus kestusega t. Tõrketu töö tõenäosus ajavahemikus AC väljendub siis

$$p(t' + t'') = p(t')p(t''/t'),$$

kus $p(t''/t')$ on tõrketu töö tinglik tõenäosus vahemikus BC eeldusel, et vahemikus AB tõrget ei olnud. Tähistame $q(t''/t')$ tõrke tekkimise tingliku tõenäosuse vahemikus BC eeldusel, et vahemikus AB tõrget ei olnud. Siis võime kirjutada, et

$$p(t' + t'') = p(t')[1 - q(t''/t')]$$

ja avaldades siit $q(t''/t')$, saame:

$$q(t''/t') = 1 - \frac{p(t' + t'')}{p(t')}. \qquad (1.4.8)$$

Viimasest valemist näeme, et tõrke tekkimise tõenäosus vahemikus BC eeldusel, et vahemikus AB tõrget ei olnud, sõltub ainult vahemiku BC pikkusest t'' ja tema kaugusest viimasest tõrkest momendil A, mitte sellest, kunas toimus

eelviimane tõrge, kolmas tõrge lõpust lugedes jne. Teiste sõnadega, tõrgete jaotuse mõju uue tõrke tekkimisele on piiratud viimase tõrkega.

Paragrahvis 1.2 käsitlesime pikemalt tõrketu tööaja eksponentjaotust. Matemaatiliselt avalduvad tõrketusparameetrid tõrketu tööaja eksponentjaotuse korral väga lihtsate valemite abil. Eeldame nüüd, et ka süsteemi detailil, mis asub mingis kindlas positsioonis ja mis tõrke korral asendatakse teise sama tüüpi detailiga, on tõrketu tööaeg jaotunud eksponentsiaalselt. Nagu nägime paragrahvis 1.1, väljendub tõrke tekkimise tinglik tõenäosus vahemikus $(t, t + \mathrm{d}t)$ eeldusel, et vahemikus $(0, t)$ tõrget ei olnud, tõrkeintensiivsuse $\lambda(t)$ kaudu järgmiselt:

$$\mathrm{d}q(t/0, t) = \lambda(t)\,\mathrm{d}t.$$

Kuna eksponentjaotuse puhul on $\lambda(t) = \lambda$, siis saame:

$$\mathrm{d}q(t/0, t) = \lambda\,\mathrm{d}t.$$

Tõrkevoo parameetri leiame valemiga (1.4.2):

$$\lambda^*(t) = \frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t} = \lambda.$$

Kui detaili tõrketu tööaeg on jaotunud eksponentsiaalselt, siis on tõrkevoog statsionaarne algusest peale:

$$\lambda^*(t) = \lambda^*.$$

Tõrkevoo parameeter λ^* on võrdne detaili tõrkeintensiivsusega:

$$\lambda^* = \lambda. \qquad (1.4.9)$$

Avaldisest (1.4.9) näeme, miks tõrkevoo parameetrit $\lambda^*(t)$ nimetatakse ka tõrkevoo intensiivsuseks. Kuid põhimõtteliselt on tõrkevoo parameeter ja detaili tõrkeintensiivsus kaks erinevat suurust ja nende väärtused langevad kokku ainult erijuhtudel.

Kasutame valemit (1.4.8) järelmõju olemasolu väljaselgitamiseks eksponentjaotuse puhul:

$$q(t''/t') = 1 - \frac{p(t' + t'')}{p(t')} = 1 - \frac{e^{-\lambda(t'+t'')}}{e^{-\lambda t'}} = 1 - e^{-\lambda t''}.$$

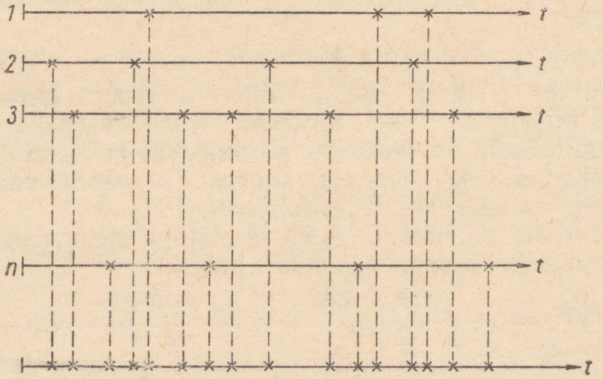
Avaldise paremast poolest näeme, et tõrke tõenäosus ei sõltu üldse sellest, kunas tekkis viimane tõrge (ei sõltu suurusest t'), vaid sõltub ainult vaadeldava ajavahemiku

kestusest t''. Sel juhul räägitakse, et tõrkevoog on ilma järelmõjuta.

Massilise teenindamise teoorias nimetatakse ordinaarset, statsionaarset ja ilma järelmõjuta voogu lihtsaimaks. Niisiis, tõrkevoog on lihtsaim, kui detaili tõrketu tööaeg on jaotunud eksponentsiaalselt.

Järgnevalt vaatleme süsteemi tõrkevoogu. Oletame, et süsteemis on n detaili, kusjuures ükskõik missuguse detaili tõrge kutsub esile ka süsteemi tõrke. Edasi eeldame, et erinevate detailide tõrked tekivad üksteisest sõltumata. Tõrke puhul toimub süsteemi remont, mis seisneb tõrkunud detaili väljavahetamises. Arvestame, et detaili väljavahetamine toimub silmapilkselt.

Kindlas positsioonis detaili tõrked moodustavad tõrkevoo. Kokku on meil niisiis n detailide tõrkevoogu, kusjuures nende tõrkevoogude parameetrid on üldjuhul erinevad sõltuvalt detaili tüübist, tema kohast elektrilises skeemis, mis tingib erineva elektrilise koormuse, tema ruumilisest paigutusest, mis määrab detaili temperatuuri, ja reast teistest teguritest. Süsteemi tõrked moodustavad omakorda tõrkevoo. Kujutame süsteemi tõrkevoogu n detaili tõrkevoogude summana ja väljendame süsteemi tõrkevoo parameetri $\Lambda^*(t)$ detailide tõrkevoogude parameetrite $\lambda_i^*(t)$ kaudu $(1 \leqslant i \leqslant n)$. Detailide tõrkevoogude liitmist süsteemi tõrkevooks illustreerib joonis 1. 4. 5, kus ristikesega on tähistatud tõrke tekkimise



Joon. 1. 4. 5. Süsteemi tõrkevoo moodustumine detailide tõrkevoogudest

moment ajateljel. Tähistame tähisega $m_i(t)$ i-nda elemendi keskmise tõrgete arvu ajavahemikus $(0, t)$. Siis võime kirjutada:

$$M(t) = m_1(t) + m_2(t) + \ldots + m_n(t) = \sum_{i=1}^{n} m_i(t), \tag{1.4.10}$$

kus $M(t)$ on süsteemi keskmine tõrgete arv vahemikus $0 \ldots t$. Diferentseerides seda avaldist t järgi, saame tõrkevoo parameetri definitsiooni (1.4.1) põhjal:

$$\Lambda^*(t) = \lambda_1^*(t) + \lambda_2^*(t) + \ldots + \lambda_n^*(t) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i^*(t). \tag{1.4.11}$$

Näeme, et tõrkevoogude liitmisel liituvad tõrkevoogude parameetrid.

Juhime tähelepanu sellele, et süsteemi tõrkevoog on ordinaarne, kuna detailide tõrkevood on ordinaarsed ja erinevate detailide tõrked tekivad üksteisest sõltumata.

Eespool nägime, et kui mitte algusest (nagu see on eksponentjaotuse korral), siis vähemalt teatud aja pärast võime detailide tõrkevooge lugeda statsionaarseiks. Järelikult ka süsteemi tõrkevoog muutub teatud aja möödumisel statsionaarseks. Kuna valemite (1.4.6) ja (1.4.7) põhjal on

$$\lambda_i^* = \frac{1}{t_{ki}^*} = \frac{1}{t_{ki}} \quad (1 \leqslant i \leqslant n),$$

siis asendades λ_i^* viimase avaldise valemisse (1.4.11), saame:

$$\frac{1}{T_k^*} = \frac{1}{t_{k1}} + \frac{1}{t_{k2}} + \ldots + \frac{1}{t_{kn}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{t_{ki}}, \tag{1.4.12}$$

kus T_k^* on süsteemi keskmine tõrgetevaheline tööaeg. Valemi (1.4.12) abil võime leida süsteemi keskmise tõrgetevahelise tööaja, kui meil on teada detailide keskmine tõrketu tööaeg. Seejuures pole tähtis teada, kuidas on jaotunud tõrketu tööaeg üksikutel detailidel.

Detailide tõrkevood on reeglina piiratud järelmõjuga vood. Ainult erijuhul, kui detailide tõrketu tööaeg on jaotunud eksponentsiaalselt, järelmõju puudub. Kui süsteemis on palju detaile, moodustub tema tõrkevoog paljudest liidetavatest tõrkevoogudest. Enam-vähem läbi-

mõeldud konstruktsiooni ja korraliku valmistamise puhul puuduvad süsteemis detailid, mille tõrked esineksid tunduvalt sagedamini teiste detailide tõrgetest. Iga detaili tõrkevoo parameeter on palju kordi väiksem süsteemi tõrkevoo parameetrist; detailide tõrkevoo parameetrid erinevad üksteisest palju kordi vähem kui ükskõik missuguse detaili ja süsteemi tõrkevoo parameetrid.

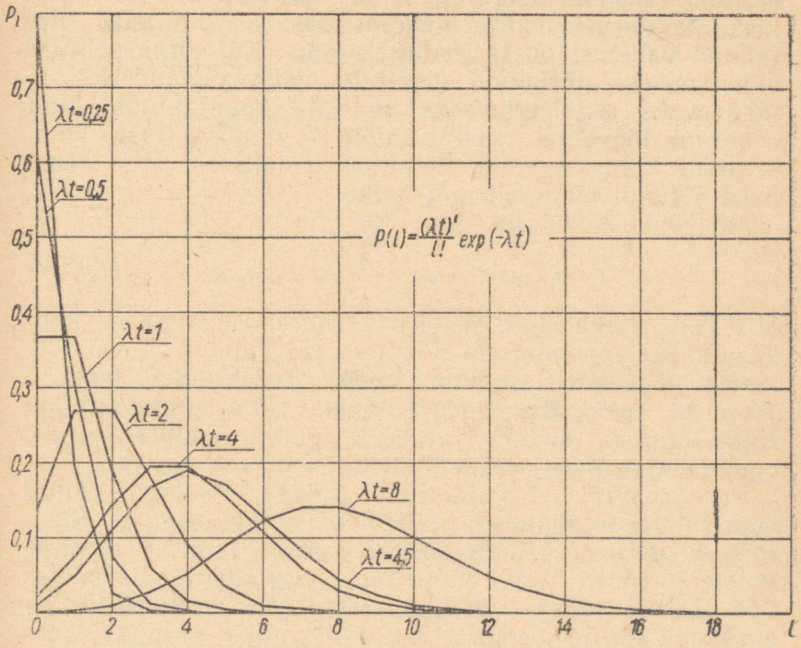
Oletame, et rivist langes välja detail positsioonis numbriga i. Kuna süsteemis on palju detaile ja iga detaili tõrkeintensiivsus on väike, siis on väga vähe tõenäoline, et järgmine tõrge tekiks samuti detailis, mis asub i-ndal kohal. Oletame, et järgmine tõrge tekkis detailis, mis asub j-ndal kohal, kusjuures $i \neq j$. Kuid tõrked detailides i-ndal ja j-ndal kohal toimuvad teineteisest sõltumata. Teiste sõnadega, tõrke tekkimise tõenäosus j-ndas detailis ei sõltu sellest, kunas tekkis tõrge i-ndas detailis. Jõuame järeldusele, et eespool kirjeldatud tingimustel on süsteemi tõrkevoog järelmõjuta. Kuna süsteemi tõrkevoog on ordinaarne ja kasutuselevõtmise momendist teatud aja möödumisel ka statsionaarne, võime süsteemi tõrkevoo lugeda lihtsaimaks sõltumata sellest, kuidas on jaotunud detailide tõrketu tööaeg. Kui detailide tõrketu tööaeg on jaotunud eksponentsiaalselt, on süsteemi tõrkevoog lihtsaim kasutamise algusest peale.

Vaatame, kuidas on jaotunud tõrgete arv süsteemi tõrkevoos ajavahemikus kestusega t. Lihtsaima voo puhul ei sõltu tõrgete arvu jaotus sellest, milline on ajavahemiku algmoment, vaid ainult tema kestusest t. Keskmine tõrgete arv selles vahemikus on $\Lambda^* t$, kus Λ^* on süsteemi tõrkevoo parameeter. Võib näidata, et tõrgete arv l on jaotunud Poissoni jaotuse järgi parameetriga $\Lambda^* t$:

$$P_l = \frac{1}{l!} (\Lambda^* t)^l \exp(-\Lambda^* t), \qquad (1.4.13)$$

kus P_l on täpselt l tõrke esinemise tõenäosus vahemikus kestusega t (vt. joonis 1.4.6). Sama valemit võime kasutada ka täpselt l tõrke esinemise tõenäosuse määramiseks ajavahemiku t vältel detaili tõrkevoos juhul, kui detaili tõrketu tööaeg on jaotunud eksponentsiaalselt tõrkeintensiivsusega λ. Sel juhul tuleb Λ^* asendada λ-ga.

Valemist (1.4.13) võime leida ka süsteemi tõrketu töö



Joon. 1. 4. 6. Poissoni jaotus

tõenäosuse ajavahemiku t vältel. Selleks tuleb tõrgete arv l võtta võrdseks nulliga. Saame:

$$P_0 = \exp\,[-\Lambda^* t]. \qquad (1.4.14)$$

Ka siin ei sõltu tõenäosus sellest, kus kohal ajateljel asub ajavahemikku kujutav lõik pikkusega t.

1. 5. Remonditavusparameetrid. Tehniline ressurss

Järgnevalt asume remonditavusparameetrite vaatlemisele. Taastatava süsteemi kasutuselevõtmise algusest kuni kasutamise lõpetamiseni võib täheldada nelja erinevat seisundit: süsteem töötab, täites temale pandud funktsioone, süsteemi remonditakse pärast tõrke tekkimist või avastamist, süsteemis tehakse mingisuguseid spetsiifilisi profülaktilisi töid või süsteem on jõudeseisundis. Jõude-

seisundi olemust selgitame paari näitega. Kui süsteemi kasutatakse ainult üks vahetus päevas, siis kaks ülejäänud vahetust on ta jõudeseisundis. Kui tõrke põhjuse avastamiseks, tõrkunud detailide väljavahetamiseks ja järgnevaks reguleerimiseks on vaja kolm tundi, kuid süsteemi töövõime taastati alles 7 tunni pärast, kuna 4 tundi kulus vajalike detailide leidmiseks, siis loeme need 4 tundi jõudeseisundi hulka.

Me võime kirjutada, et

$$T = T_{töö} + T_{rem} + T_{prof} + T_{jõude}, \qquad (1.5.1)$$

kus T on ajavahemik süsteemi kasutamise algusest kuni kasutamise lõpetamiseni aastates või kuudes, T_t on tõrketute tööaegade summa sama ajavahemiku jooksul, T_{rem} on remondikestuste summa, T_{prof} profülaktiliste tööde kestuste summa ja $T_{jõude}$ jõudeseisundite kestuse summa ajavahemiku T vältel.

Paragrahvis 1.4 vaatlesime tõrketu tööajaga seotud suurusi, teiste sõnadega, avaldise (1.5.1) esimese liidetava koostisosi. Kuna meid huvitab remondi kestus, võime jooniselt 1.4.1 välja jätta sirglõigud, mis vastavad tõrketu töö ja profülaktiliste tööde kestusele. Me saaksime siis joonisega 1.4.2 analoogilise graafiku, kusjuures vahe seisneks ainult selles, et joonisele 1.4.2 on kantud tõrketu tööaeg, uuel graafikul oleks aga remondi kestus. Iga püstkriips vastaks ühe remondi lõpule ja teise remondi algusele, teiste sõnadega, süsteemi töövõime taastamise momendile. Siis on meil tegemist nn. taastamisvooga. Analoogiliselt paragrahvis 1.4 vaadeldud tõrkevooga võiksime defineerida taastamisvoo parameetri, määrata tema kaudu keskmise remondikestuse jne. Kuid vältides kordamist, kasutame mõningate lihtsate seoste tuletamiseks teisi teid.

Olgu t_{ri} süsteemi remondiks vajalik keskmine aeg tingimusel, et süsteemi tõrge oli tingitud i-nda detaili tõrkest. Tähistagu p_i tõenäosust, et süsteemi tõrke põhjuseks oli i-nda detaili tõrge. Kuna p_i on seda suurem, mida suurem on i-nda detaili tõrkeintensiivsus, siis

$$p_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^{n} \lambda_i} = \frac{\lambda_i}{\Lambda},$$

kus n on detailide arv süsteemis, Λ süsteemi tõrkeintensiivsus. Kui me tähistame T_{rk}-ga süsteemi remondi keskmise kestuse, siis võime kirjutada, et

$$T_{rk} = \sum_{i=n}^{n} p_i t_{ri} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\lambda_i}{\Lambda} t_{ri} = \frac{1}{\Lambda} \sum_{i=1}^{n} \lambda_i t_{ri}.$$

Kuid

$$\frac{1}{\Lambda} = T_k.$$

Lõplikult

$$T_{rk} = T_k \sum_{i=1}^{n} \lambda_i t_{ri}. \qquad (1.5.2)$$

Need parameetrid, millega me siiani tutvusime, iseloomustavad toodet kas ainult tõrketuse või ainult remonditavuse seisukohalt. Kuid võib kasutada ja praktikas kasutataksegi parameetreid, mis määratakse nii tõrketuse kui ka remonditavusega.

Selliseid parameetreid võiks nimetada koond- või kompleksparameetriteks. Tuntumad neist on valmidustegur ja tehniline kasutustegur.

Valmidustegur K_v määratakse valemiga

$$K_v = \frac{T_{töö}}{T_{töö} + T_{rem}}, \qquad (1.5.3)$$

kus $T_{töö}$ on tõrketute tööaegade summa süsteemi kasutamise algusest kuni kasutamise lõpetamiseni, T_{rem} on remondikestuste summa sama ajavahemiku jooksul. Selle asemel, et vaadelda ajavahemikku kasutamise algusest kuni selle lõpetamiseni, võib vaadelda ka mõnda teist küllalt pikka vahemikku (näiteks aastat). Kui selles ajavahemikus toimus l tõrget, siis ka remontide arv oli l ja

$$K_v = \frac{T_k l}{T_k l + T_{rk} l},$$

kus T_k on keskmine tõrketu tööaeg ning T_{rk} remondi keskmine kestus. Seega:

$$K_v = \frac{T_k}{T_k + T_{rk}}. \qquad (1.5.4)$$

Teeme tõepärase kitsenduse, et profülaktilisi töid süsteemis tehakse siis, kui ollakse veendunud, et süsteemi ei

tule kasutada. Neil ajamomentidel, kui süsteemi on vaja kasutada, on süsteem kas töövõimeline või teda remonditakse. Näeme, et valmidustegurit võib vaadelda kui tõenäosust, et süsteem vabalt võetud ajamomendil on töövõimeline, valmis oma funktsioone täitma. Siit siis tema nimetus.

Kui toote iseloomust lähtudes on õige tema töökindlust määrata valmidusteguri abil, võib ilmneda, et toode, kus tõrked tekivad sagedasti, kuid nende kõrvaldamine võtab vähe aega, on töökindlam tootest, kus tõrked tekivad harva, aga nende kõrvaldamine kestab kaua.

Seisakutegur K_s määratakse valemiga

$$K_s = \frac{T_{rk}}{T_k + T_{rk}};$$

loomulikult

$$K_v + K_s = 1.$$

Mõnikord on tarvis arvutada süsteemi valmidustegurit, teades detailide tõrkeintensiivsust ja aega, mis keskmiselt kulub iga elemendi tõrke kõrvaldamiseks. Leiame vastava valemi, asetades avaldise (1.5.2) avaldisse (1.5.4):

$$K_v = \frac{T_k}{T_k + T_k \sum_{i=1}^{n} \lambda_i t_{ri}},$$

kust

$$K_v = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{n} \lambda_i t_{ri}}. \qquad (1.5.5)$$

Tehniline kasutustegur K_{tkt} määratakse valemiga

$$K_{tkt} = \frac{T_{töö}}{T_{töö} + T_{rem} + T_{prof}}. \qquad (1.5.6)$$

Kui vaadelda lihtsalt kasutustegurit

$$K_{kt} = \frac{T_{töö}}{T_{töö} + T_{rem} + T_{prof} + T_{jõude}},$$

võime veenduda, et tehniline kasutustegur iseloomustab süsteemi puhttehnilisest seisukohast, kasutustegur arvestab aga ka seda, kui efektiivselt on süsteemi kasutamine organiseeritud, kui suured on jõudeajad.

On teada, et mõningatel elektronarvutite tüüpidel on väga hea valmidustegur, kuna remonti teostatakse blokkide väljavahetamisega ja remondi kestus on väike. Samal ajal on neil arvutitel madal tehniline kasutustegur, kuna mitu tundi päevas kulutatakse profülaktiliseks teenindamiseks.

Lõpuks peatume toote töökindluse kolmanda komponendi — kestvuse mõistel. Kui tõrketuse ja remonditavuse mõisted on enam-vähem kindlalt välja kujunenud, siis kestvuse tõlgitsemisel valitseb suur segadus. Mitmesugustes standardites ja normaalides võib vaid suure vaevaga kindlaks teha, mida koostajad mõistavad kestvuse (долговечность), tehnilise ressursi (технический ресурс), ressursi, teenistusea (срок службы) jne. all. Koostajad ei pea vajalikuks defineerida kasutatavaid mõisteid või kui nad seda teevad, siis toimub see mõne uue, samuti kaksipidi arusaadava mõiste abil. Konstrueerimisbüroode ja tehaste praktilises töös kutsub terminoloogias valitsev segadus esile asjatuid vaidlusi, liigset kirjavahetust, konstrueerimisülesannete valesti mõistmist, ekspluatatsiooniandmete ebaõiget hinnangut ja muud sellesarnast.

Sellise segaduse põhjustajaks on kindlasti ka asjaolu, et praegusel tehnika tormilise arengu ajastul vananeb toode tihti moraalselt enne, kui on ammendatud kõik tema tehnilised võimalused. Jättes siinkohal kõrvale moraalse vananemisega seotud küsimused, lepime kokku, et kestus määratakse toote tehniliste võimalustega.

Me lähtume NSV Liidu Teaduste Akadeemia Teaduslik-Tehniliste Terminite Komitee poolt avaldatud terminoloogiast raadioelektroonika valdkonnas [25], tehniliste süsteemide ja toodete töökindluse terminoloogia põhimõisteist [26] ja NSV Liidu riikliku standardi «Töökindlus tehnikas. Põhimõisted. Terminoloogia.» projektist. Kuigi nende vahel on teatud vastuolu, mis on tingitud töökindlusõpetuse arengust terminoloogiate ilmumist eraldava ajavahemiku 1962—1965 jooksul, moodustavad nad käesoleval ajal vastavale terminoloogiale kõige rangema aluspõhja.

Vaatleme detaili tõrkeintensiivsuse graafikut sõltuvalt tööajast joonisel 1. 1. 5. Graafiku selline kuju on tüüpiline paljudele detailidele. Me täheldame tõrkeintensiivsuse langu vahemikus $(0, t_1)$, konstantset tõrkeintensiivsust

vahemikus (t_1, t_2) ja tõrkeintensiivsuse järsku suurenemist pärast momenti t_2. Praktiliselt on vahemik $(0, t)$ tunduvalt väiksem vahemikust (t_1, t_2), kusjuures viimasel ajal ilmneb tendents vahemiku $(0, t_1)$ vältimiseks detailide nn. sissetöötamise abil enne tehasest väljastamist. Tõrkeintensiivsuse kasv pärast momenti t_2 on, nagu juba öeldud, järsk, mille tõttu ei ole detaili edasiselt otstarbekas kasutada. Võib veel öelda, et paljudel detailidel, millel põhimõtteliselt tuleb eeldada järsult tõusva osa esinemist pärast momenti t_2, on see moment niivõrd kaugel, et suhteliselt lühikeste, kümme-viisteist aastat tagasi ülesseatud katsete puhul viibime ikka veel konstantse tõrkeintensiivsuse piirkonnas. Kuid see asjaolu ei takista meid kestvuse iseloomustamiseks kasutamast ajavahemikku $(0, t_2)$. Nimetame seda detaili tehniliseks ressursiks. Juhime tähelepanu sellele, et tehnilise ressursi määramisel tuleb arvesse ainult aeg, mille vältel detail asub tööolukorras (süsteem, kus detail asub, on sisse lülitatud).

Tehnilise ressursi sellisel defineerimisel ei tohi me teda ära segada detaili keskmise tõrketu tööajaga tööaja eksponentjaotuse korral vahemikus (t_1, t_2). Siis, nagu me nägime, on tõrkeintensiivsus konstantne. Keskmine tõrketu tööaeg määratakse valemiga 1. 2. 3 ning küllalt väikese tõrkeintensiivsuse väärtuse korral võime saada keskmise tõrketu tööaja suurema kui tehniline ressurss. Asi seisneb siin loomulikult selles, et valemi 1. 2. 3 kasutamisel loeme tõrkeintensiivsuse konstantseks 0-st ∞-ni, tehnilise ressursi määramisel lähtume aga tõrkeintensiivsuse tegelikust graafikust koos momendist t_2 alates esineva järsu tõusuga. Siin peitub ka üks põhjustest, miks detailide tõrketusparameetritest eelistatakse tõrkeintensiivsust, aga mitte keskmist tõrketut tööaega.

Kui on tegemist taastatava süsteemiga, siis võib ka tõrkevoo parameetri graafikul mõnikord täheldada kolme osa analoogiliselt joonisega 1. 1. 5. Kui vahemikule (t_1, t_2), kus tõrkevoo parameeter on suhteliselt stabiilne, järgneb tõrkevoo parameetri järsk suurenemine alates ajamomendist t_2, siis loeme ka siin tehniliseks ressursiks ajavahemikku $(0, t_2)$. Tehnilist ressurssi väljendatakse süsteemi faktiliselt töötatud tundidega või mõne muu ekvivalentse ühikuga.

2.

Ümbritsev keskkond ja aparatuuri kasutamisolud. Raadiodetailide töökindlus

2.1. Ümbritsev keskkond ja aparatuuri kasutamisolud

Elektroonikaaparatuuri ümbritseva keskkonna all mõistame selle aparatuuri kasutamiskoha geograafilise asendiga määratud tingimuste kompleksi. Tähtsamad neist tingimustest on ümbritseva õhu temperatuur, niiskus ja rõhk, nende muutumine ööpäeva ja aasta kestel, härmatise, kaste, udu olemasolu, tolmu esinemine õhus jne.

Kui geograafiline asend ei muutu, s. t. ümbritsev keskkond on ühesugune, muutuvad ometigi aparatuuri kasutamisolud sõltuvalt sellest, kas aparatuur on üles seatud laboratooriumis, tsehhis, lageda taeva all, autol, laeval, lennukil vm. Uute teguritena tulevad siin vaatluse alla aparatuurile mõjuv mehaaniline vibratsioon, mehaaniliste löökide olemasolu, lineaarsete kiirenduste võimalus jne. Hoonetes ja sõidukitel kasutamisel ei jää loomulikult muutumatuks ka aparatuuri ümbritseva õhu temperatuur ning teised parameetrid. Ühesõnaga, aparatuuri kasutamisolude kujundamisel on ümbritsev keskkond ainult üks teguritest.

Detaili töötamistingimused aparatuuris määratakse peale aparatuuri kasutamisolude ja elektriliste parameetrite (rakendatud pinge, eralduv võimsus) väärtuste veel detaili kasutamise lokaalsete, kohalike iseärasustega. Arvesse tulevad soojust eraldavate teiste detailide olemasolu vaadeldava detaili läheduses, eralduva soojuse ärajuhtimise võimalused jne. Töötamistingimuste mõju detaili töökindlust iseloomustavatele parameetritele vaatleme paragrahvis 2. 3.

Konstrueerimisbüroode ja tehaste kogemused näita-

vad, et raadioinsenerid ja -tehnikud tunnevad puudulikult ümbritseva keskkonna iseärasusi erinevates maades, eri aastaaegadel ja ööpäeva erinevatel perioodidel. Sama väide kehtib erisuguste kasutamisolude kohta hoonetes ja sõidukites, maal ja merel, merepinna tasemel ja suurtes kõrgustes. Ka ei ole alati küllaldast ettekujutust sellest, kuidas detailide töötamistingimused aparatuuris mõjutavad detailide töökindlust.

Praegusel ajal, kus Eestis toodetavat aparatuuri kasutatakse nii kodu- kui ka välismaal, sealhulgas ka troopilise kliimaga maades, on vaja tutvuda põhiliste kliimatsoonidega maakeral.

Maakera pinna võime liigitada neljaks suureks kliimatsooniks, võttes jaotamise aluseks kliima mõju aparatuurile.

Mõõdukas kliimas on õhutemperatuur harva alla —30° C ja üle +35° C. Suhteline õhuniiskus üle 80% temperatuuril 20° C ja rohkem esineb erandjuhtudel. Mõõdukas kliima valitseb Lääne-Euroopas, Nõukogude Liidu Euroopa-osas, Põhja-Ameerika keskosas, Lõuna-Ameerika ja Austraalia lõunaosades. Mõõdukas kliimas on keskmine kuutemperatuur talvel alla —3° C, suvel üle +10° C. Kõrge suhteline õhuniiskus üle 80% esineb mõõdukas kliimas alati õhutemperatuuril alla 20° C. Temperatuuri kõikumine ööpäeva jooksul on mõnest kraadist kaheksa kuni kümne kraadini.

A. Astafjev [9] soovitab raadiotehnilise aparatuuri konstrueerimisel lähtuda mõõduka kliima sellistest iseloomulikest näitajatest:

minimaalne temperatuur —40° C;
keskmine minimaalne temperatuur —30° C;
maksimaalne temperatuur 40° C;
keskmine maksimaalne temperatuur 35° C;
maksimaalne temperatuuri kõikumine ööpäevas 11° C;
keskmine maksimaalne suhteline niiskus 20° C juures 80%;
maksimaalne lühiajaline suhteline niiskus 20° C juures 90%;
esinevad härmatis, jäätumine, kaste, udu, mereäärsetes piirkondades sisaldab õhk suurenenud hulgal mitmesuguseid sooli.

Seoses suurenenud ekspordiga troopikamaadesse peab meil olema ülevaade sealsest kliimast. Troopikamaade

kliimat võib liigitada kaheks: niiskeks troopikakliimaks ja kuivaks troopikakliimaks.

Niiske troopikakliima valitseb India lõunaosas, Tseilonil, Kagu-Aasias, Indoneesias, Kesk- ja Lääne-Aafrikas, Kesk-Ameerikas ja Lõuna-Ameerika põhjaosas. Sellele kliimale on iseloomulik õhutemperatuur pidevalt üle 20° C ja suhteline õhuniiskus üle 80% vähemalt 12 tundi ööpäevas. Esinevad paduvihmad sademete hulgaga kuni 100 mm 10 minuti jooksul. Tüüpilistes troopikakliimaga maades erineb jaanuari ja juuli keskmine temperatuur ainult 1 ... 2° C võrra. Aasta keskmine temperatuur on 20 ... 25° C. Temperatuur muutub ööpäeva vältel aeglaselt, kuna temperatuuri muutumist pidurdab vee aurustumine pärast päikese tõusmist ja veeauru kondenseerumine pärast päikese loojumist. Keskmine suhteline õhuniiskus on 90%, päeval see langeb kuni 70 ... 80%.

Niiskes troopilises kliimas kasutamiseks määratud aparatuuri konstrueerimisel soovitatakse [9] lähtuda järgmistest arvudest:

minimaalne temperatuur kliimatsooni piiril üle +3° C;
maksimaalne temperatuur harva üle 40° C;
maksimaalne temperatuuri kõikumine ööpäevas 10° C;
maksimaalne suhteline õhuniiskus 35° C juures 95%;
musta mattpinna maksimaalne temperatuur otsese päikesekiirguse all 75° C;
sagedased paduvihmad, kaste, tolm, liiv.

Tuleb arvestada ka aparatuuri kahjustamise võimalust putukate, näriliste ja roomajate poolt.

Erinevalt niiskest troopikakliimast iseloomustab kuiva troopikakliimat kõrge õhutemperatuur koos väga väikese suhtelise niiskusega päeval ja suur temperatuuri kõikumine ööpäeva vältel. Kuiv troopikakliima valitseb Põhja-Aafrikas, Austraalias, Iraanis, Kasahstanis ja teistes Nõukogude Liidu Kesk-Aasia vabariikides, Kesk-Austraalias, Kalifornias ja mõningatel teistel kõrbe- ja stepialadel. Väikese sademetehulga ja äärmiselt madala suhtelise õhuniiskuse juures on päikesekiirguse hajumine atmosfääris minimaalne. Intensiivne päikesekiirgus on üks kahjulikest teguritest, mis mõjub aparatuurile kuivas troopikakliimas. Esinevad liivatormid. Isegi mõõduka tuule korral tekivad liiva- ja tolmupilved mõnekümne

sentimeetri kõrgusel maapinnast. Tuleb arvestada aparatuuri kahjustamise võimalust putukate poolt.

Kuiva troopikakliimat iseloomustavad järgmised arvud:
lühiajaline minimaalne temperatuur —10° C;
maksimaalne temperatuur harva üle 55° C;
keskmine maksimaalne temperatuur 40° C;
temperatuuri maksimaalne kõikumine ööpäevas 40° C;
keskmine maksimaalne suhteline niiskus 20° C juures 80%;
minimaalne suhteline niiskus 40° C juures 10%;
musta mattpinna maksimaalne temperatuur otsese päikesekiirguse all 85° C;
esineb kaste, tolm, liivatormid; õhk sisaldab suurenenud hulgal sooli;
aparatuuri kahjustamise hädaoht putukate, näriliste ja roomajate läbi on suur.

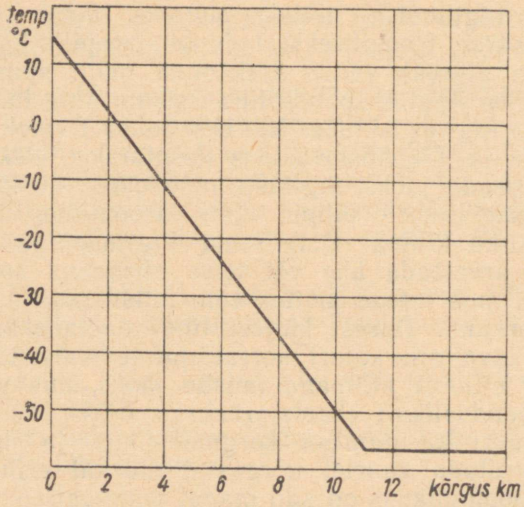
Külm kliima on Euroopa põhjaosas, Siberi igijää ja tundrate piirkonnas, Alaskas, Kanadas, Gröönimaal, Antarktises, Põhja-Jäämerel. Külma kliimaga maades kasutamiseks määratud aparatuuri projekteerimisel võib konstruktor kasutada järgmisi arve:

maksimaalne temperatuur väga harva alla —60° C (Antarktises alla —70° C); temperatuur alla —30° C esineb sagedasti;
keskmine minimaalne temperatuur —50° C;
maksimaalne temperatuur harva üle 30° C;
maksimaalne aastatemperatuuri kõikumine kuni 100° C;
maksimaalne temperatuuri kõikumine ööpäevas kuni 40° C;
keskmine maksimaalne suhteline niiskus 20° C juures 80%;
temperatuuri sagedane üleminek 0° C-st — härmatis, jäätumine, udu;
keskmine tuulekiirus talvekuudel 6 . . . 7 $\frac{m}{s}$ (22 . . . 25 $\frac{km}{h}$);
lumetormid tuulekiirusel kuni 40 $\frac{m}{s}$ (140 $\frac{km}{h}$), Antarktises üksikud puhangud kuni 100 $\frac{m}{s}$ (360 $\frac{km}{h}$);
suvekuudel palju putukaid (sääski), näiteks Ida-Siberi tundrates.

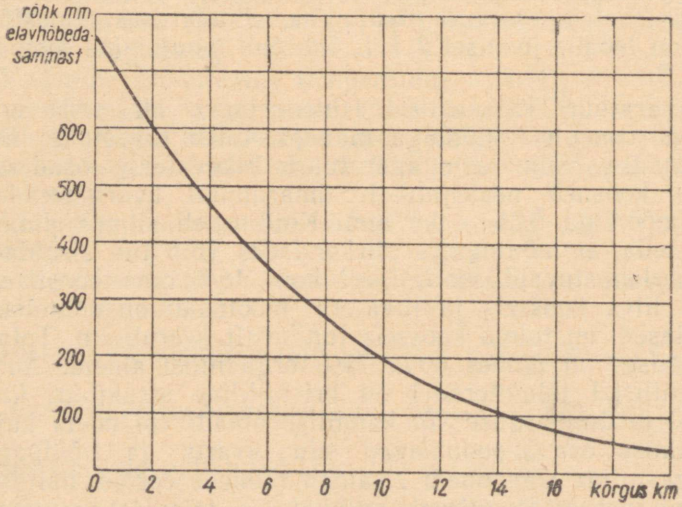
Kliima liigitamisel neljaks suureks tüübiks (mõõdukaks, niiskeks troopiliseks, kuivaks troopiliseks ja külmaks) on aluseks välise keskkonna mõju aparatuurile. Liigitusel on tinglik, spetsiifiline iseloom ning loomulikult ei ole see liigitus ainuke. Näiteks Saksa Demokraatlikus Vabariigis ja Tšehhoslovakkias kasutatakse elektrotehnilise sisseseade jaoks liigitust: mõõdukas, niiske troopiline, niiske subtroopiline, kuiv troopiline, külm ja kõrgmäestiku kliima. Detailsema liigituse puhul saab paremini arvestada ühe või teise piirkonna spetsiifilisi iseärasusi, mis teatud mõttes võib lihtsustada aparatuuri konstrueerimist. Teisest küljest tingib detailsem liigitus üldkasutatava aparatuuri korral mitme variandi väljatöötamist erineva kliimaga maade jaoks, mis võib osutuda majanduslikult ebaotstarbekaks.

Aparatuuri kasutamisel kõrgmäestikus ja lennukitel tuleb arvestada suurtel kõrgustel olevaid erilisi tingimusi. Iseloomulikuks on siin madal temperatuur ja madal õhurõhk. Küsimuse teeb keeruliseks asjaolu, et õhutihedus ja õhutemperatuur ei sõltu ainult kõrgusest maapinnalt, vaid ka piirkonna klimaatilistest iseärasustest. Keskmiste tingimuste kirjeldamiseks kasutatakse nn. rahvusvahelist standardset atmosfääri, teiste sõnadega, õhutemperatuuri ja õhurõhu standardset sõltuvust kõrgusest. Õhutemperatuuri muutumine standardses atmosfääris on toodud joonisel 2. 1. 1, õhurõhu muutumine joonisel 2. 1. 2.

Aparatuuri kasutamisel lahtise taeva all, seda eriti kuiva troopilise kliimaga maades, tuleb arvestada liiva sattumise võimalust aparatuuri liikuvatesse osadesse. Liiv koosneb peaasjalikult ümardunud kvartsiteradest läbimõõduga 0,06 ... 0,8 mm. Kuid tuleb silmas pidada ka seda, et mõningates piirkondades võib liiv sisaldada vees lahustuvaid sooli, isegi kuni 18% oma koostisest. Kui liiva koosseis ja liivatera mõõtmed on suhteliselt ühtlased, on tolmu koosseis tunduvalt keerulisem. Tolmu koostises on umbes 60 ... 75% orgaanilisi aineid. Anorgaanilistel tolmuteradel on kristalliline struktuur, kare pind ja ümmarguse või kandilise plaadi või nõela kuju. Peamise osa moodustavad siin kvarts ja põldpagu. Orgaaniline komponent sisaldab taimede eoseid, hallitusseeni, baktereid, viirusi, putukate ja taimede peenimaid kõdunemisjäänuseid, villa- ning puuvillakiudude jäänu-



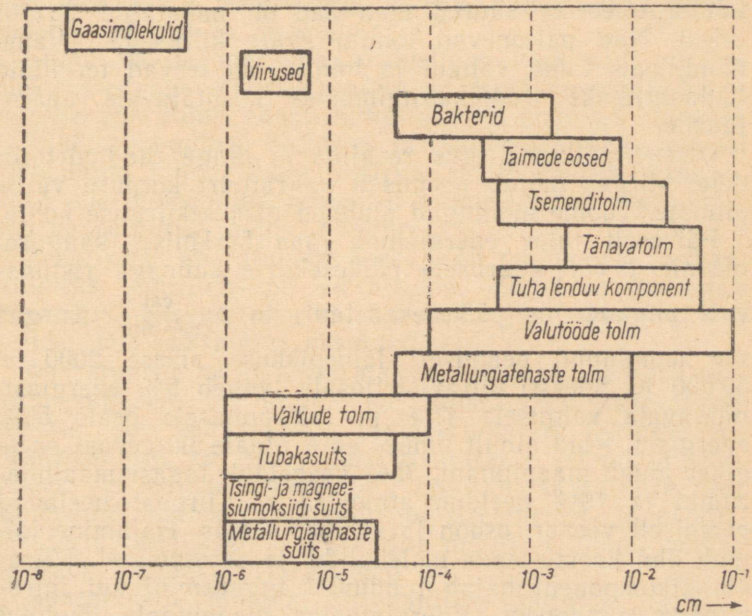
Joon. 2. 1. 1. Õhutemperatuuri muutumine standardses atmosfääris



Joon. 2. 1. 2. Õhurõhu muutumine standardses atmosfääris

seid. Linna tolm võib sisaldada kuni 37% orgaanilist komponenti, mis koosneb peaasjalikult tahmast ja vaikudest. Tolmuterade mõõtmetest annab mingisuguse ettekujutuse joonis 2. 1. 3. Tolmu kontsentratsioon väheneb ligikaudu eksponentsiaalselt kõrgusega maapinnast. Näiteks registreeriti 1 cm^3 õhus maapinna läheduses 98 tolmutera, samal ajal 1500 m kõrgusel keskmiselt ainult üks tolmutera. Kuid kontsentratsioon sõltub loomulikult vaadeldavast piirkonnast.

Elektroonikaaparatuuri bioloogilistest kahjustajatest esinevad kõige sagedamini hallitusseened ja termiidid, eriti niiskes troopilises ja kuivas troopilises kliimas. Kuid ka mõõdukas kliimas esineb hallitusseente kiiret kasvu soodustavaid tingimuste kokkulangemisi, nagu näiteks soe ja niiske halva ventilatsiooniga laoruum. Hallitusseened on looduses laialt levinud. On teada kuni 40 000 erinevat vormi.



Joon. 2. 1. 3. Tolmuterade suurused

Ainevahetuse tulemusena eraldavad hallitusseened erilisi nn. metaboliite. Teatud metaboliidid sisaldavad mitmesuguseid happeid, mis võivad esile kutsuda metallide korrosiooni ja isolatsioonimaterjalide lagunemist.

Enamiku hallitusseente arenemiseks on vajalik suur suhteline õhuniiskus (üle 85%), temperatuur 20 ... 30° C ja liikumatu õhk. Temperatuuri langedes väheneb kasvuintensiivsus ja alla +7° C ei ole eosed suutelised arenema, olgugi et nad ei hukku. Ka temperatuur kuni —190° C ei kahjusta enamasti eoseid. Hallitusseened ei kasva suhtelises õhuniiskuses alla 75%, kui toitematerjal ei sisalda hügroskoopilisi aineid. Kuid juba kasvanud hallitusseened ei hukku ja niiskuse suurenedes jätkavad uuesti kasvamist. Ainult väike osa hallitusseente liikidest on suutelised arenema temperatuuril üle 40° C. Täielikuks steriliseerimiseks on vajalik temperatuur 140 ... 160° C 2 ... 4 tunni vältel.

Putukatest on elektroonikaaparatuurile kõige hädaohtlikumad termiidid. On teada umbes 2000 erinevat liiki termiite, kusjuures Austraalia, Põhja- ja Kesk-Aafrika ning Lõuna-Ameerika suured maa-alad on nakatatud termiitidest. Nad paljunevad tohutu suure kiirusega. Vähenõudlikkus toidu valikul ja tohutu isu teevad termiidid hädaohtlikuks troopikatingimustes kasutatavale aparatuurile.

Otsene päikesekiirgus reeglina ei lange raadiodetailidele; kiirgus mõjub peamiselt aparatuuri korpuse välispinnale. Toome mõningad andmed päikesekiirguse kohta.

Päikeselt tulev energiahulk Maa keskmisel kaugusel olevale 1 cm^2 suurusele päikesekiirte suunaga ristiolevale pinnale, nn. päikesekonstant, on $2 \frac{cal.}{cm^2 \cdot min}$. Kiirgus on koondunud peamiselt lainepikkuse alasse 2000 ... 50 000 Å. Spektri ultraviolettosale langeb 9% energiast, nähtavale valgusele 41% ja infrapunasele osale 50% energiast. Kuid ainult umbes 46% Maale langevast energiast jõuab maapinnani, 35% peegeldub tagasi maailmaruumi ja 19% neeldub atmosfääris. Kiirgust neelavad peamiselt veeaur, osoon ja süsihappegaas. Hajumine toimub õhu koostisosade molekulidel ja aerosoolidel. Ultraviolettkomponent hajub tunduvalt tugevamini kui infrapunane komponent. Energiajaotus maapinnale jõudnud päikesekiirguse spektris on ligikaudu järgmine:

2900... 4000 Å — 2,7%
4000... 7000 Å — 44,3%
7000... 11 000 Å — 36,2%
üle 11 000 Å — 16,8%

Laevadel kasutatavale aparatuurile võivad langeda merevee pritsmed. Ka merevesi kahjustab aparatuuri. Proovid näitavad, et ookeanide ja merede soolasisaldus on muutuv (Vahemeres 4%, Mustas meres 2,2%, Läänemeres 0,3... 0,8%). Kuid samal ajal on erinevate soolade protsentuaalne vahekord suhteliselt konstantne. Ainult rannaäärsete vete soolasisalduses võib muutuda üks või teine komponent jõevee ja samuti sadamate heitvete tõttu.

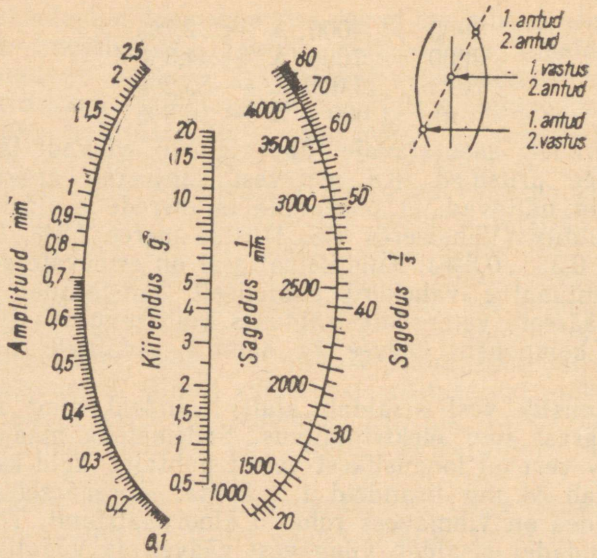
Looduslik vesi sisaldab alati lisandeid ning tal on sellepärast suur elektrijuhtivus. Sademetena maapinnale langev vesi on looduslikest vetest puhtaim, kuid ka tema sisaldab 34 mg lisandeid 1 l kohta. Mereäärsetes piirkondades on vihmavees rohkem kloornaatriumi. Tööstuspiirkondades sisaldab vihmavesi väävel- ja väävlishapet, mis moodustub atmosfääris kivisöe põletamisel, samuti lämmastikhapet ja ammoniaaki.

Siiani vaatlesime seda looduslikku keskkonda, milles elektroonikaaparatuuri kasutatakse. Kuid enamasti kasutatakse aparatuuri siiski inimeste poolt ehitatud hoonetes ja liiklusvahendites. Ehitustes ja liiklusvahendites eespool kirjeldatud klimaatiliste tegurite mõju suurus muutub, kuid uue momendina ilmnevad mitmesugused mehaanilised aparatuurile mõjuvad tegurid.

Peamisteks aparatuurile kahjulikult mõjuvateks mehaanilisteks teguriteks on vibratsioon, löögid ja lineaarne kiirendus. Nende tegurite olemasolu ja iseloom sõltub sellest, kus aparatuuri kasutatakse.

Aparatuurile mõjuva vibratsiooni põhjuseks võivad olla mitmesugused tööpingid, kui aparatuuri kasutatakse tsehhis tootmisprotsesside reguleerimiseks, liiklusvahendite mootorid, kui aparatuuri kasutatakse lennukitel, laevadel või maismaasõidukitel, aga ka aparatuuri oma elemendid, näiteks toiteseadmete sisepõlemis- ja elektrimootorid. Ka üksikud aparaadile mõjuvad löögid võivad tekitada sumbuvat vibratsiooni.

Aparatuurile mõjuvat mehaanilist koormust tavatsetakse mõõta tekitatud mehaanilise kiirendusega, kusjuures kiirendust väljendatakse raskuskiirenduse ühikutes



Joon. 2. 1. 4. Nomogramm kiirenduse leidmiseks

$1\ g = 9{,}81\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. Mehaanilise (harmoonilise) vibratsiooni kiirendust võib arvutada valemist

$$a = \frac{4\pi^2 f^2 S}{9810} \approx 0{,}004\, f^2 S,$$

kus a on kiirendus Maa raskuskiirenduse ühikutes,
f — vibratsioonisagedus hertsides või pöörete arv sekundis,
S — vibratsiooniamplituud või pöörderaadius millimeetrites.

Kiirenduse leidmiseks võib kasutada joonisel 2. 1. 4 toodud nomogrammi. Sealsamas on ka juhis nomogrammi kasutamiseks.

Löökide põhjused on samuti väga mitmesugused. Lööke saab transporditav aparatuur kaubavagunis rongi manööverdamisel, autodes ülesseatud aparatuur tee ebatasasustel, lennukiaparatuur lennuki maandumise momendil. Mitte väikese tähtsusega ei ole löögid, mis tekivad

transportimisel hooletust ümberkäimisest peale- ja mahalaadimisel. Löökide kiirendust võib arvutada hästituntud valemist:

$$a = \frac{1000\,v^2}{2 \cdot 9{,}81\,s},$$

kus v on kiirus löögi algmomendil $\frac{m}{s}$ ja s mehaaniline nihe löögi vältel millimeetrites.

Konstruktoril ei ole vaja teada mitte ainult aparatuurile mõjuva vibratsiooni maksimaalselt võimalikku kiirendust, vaid ka vibratsiooni võimalikku sagedust, kuna väline vibratsioon võib põhjustada üksikute mehaaniliste sõlmede resonantsi ja tekitada mehaanilisi vigastusi. Samuti pole kiirenduse teadmine küllaldane löökide iseloomustamiseks; me peame teadma veel löögi kestust (harilikult millisekundites). Ettekujutuse saamiseks vibratsioonist ja löökidest mitmesugustes kasutamis- ja transportimisoludes toome mõningad iseloomulikud arvud [11].

Rongis kutsub rataste «löömine» rööbaste liitekohtades esile vibratsiooni sagedusega umbes 100 Hz ja kiirendusega 2 *g*. See vibratsioon võib liituda vibratsiooniga sagedusega 2...3 Hz ja kiirendusega kuni 1,5 *g*. Manööverdamisel esinevad löögid kiirendusega kuni 20...40 *g*.

Maanteede pind kutsub esile ratasveokite telgede vibratsiooni sagedusega kuni 15 Hz. Jäigalt kinnitatud aparatuuris võivad üksikud löögid esile kutsuda vibratsiooni sagedusega kuni 120 Hz, kusjuures kiirendus pole suur. Roomikveokite roomikute «löömise» sagedus on 20...200 Hz, mis võib esile kutsuda vibratsiooni sagedusega neljasajast kuni paari tuhande hertsini. Vibratsiooni amplituud on sagedusriba alumises osas 0,025 mm, ülemises osas vähem.

Laevade kiirus muutub sujuvamalt kui näiteks rongidel manööverdamise ajal. Kuid löökide mõju arvestamata jätta pole võimalik. Kiired valvekaatrid saavad tugeva lainetuse korral lööke kiirendusega kuni 6 *g*. Suurtel sõjalaevadel projekteeritakse aparatuur arvestusega, et ta teatud kaugusel lõhkemiskohast vastu peaks näiteks miini või torpeedo lõhkemisel esineva löögi. Vibratsioon laeval on tingitud pea- ja abimasinate tööst, laevavintide pöörlemisest ning hüdrodünaamilistest jõududest. Vibratsiooni sagedus ja kiirendus erinevad laeva eri kohta-

des. Kaubalaevade vibratsioonisagedus on 0...15 Hz, amplituud kuni 1,2 mm.

Transpordilennuki maandumisel ja õhkutõusmisel esinevad löögid kiirendusega kuni 6 *g*. Hädamaandumisel võib mõjuda kiirendus kuni 25 *g* 0,1 sekundi jooksul. Kiiretel lennukitel mõjub pöörangutel aparatuurile pikema aja jooksul kiirendus kuni 12 *g*. Transpordilennuki aparatuurile mõjuva vibratsiooni amplituud on 0,05... 0,75 mm sagedustel 5...150 Hz.

Eespool toodud andmed aparatuurile mõjuva temperatuuri, õhuniiskuse, kiirenduse, löökide jne. kohta erinevates kasutamisoludes on orienteeriva iseloomuga. Vaatleme neid mitteelektrilisi tegureid, mis aparatuurile mõjuvad ja nii või teisiti tema elektrilisi parameetreid muudavad. Elektroonikaaparatuuri projekteerimisel seisneb üks ülesanne kasutamis-, säilitamis- ja transportimisolude konkretiseerimises. Kasutamis-, säilitamis- ja transportimisoludest sõltub aparatuuri elektriline skeem ja mehaaniline konstruktsioon. Kodu- ja välismaa vastavates standardites ja normaalides on aparatuur kasutamisolude järgi jaotatud gruppidesse. Iga grupi jaoks on kindlaks määratud temperatuuri, õhuniiskuse, vibratsioonisageduse ja -kiirenduse, löögikiirenduse ja -kestuse, õhurõhu ning teiste kasutamisolusid iseloomustavate parameetrite äärmised väärtused. ГОСТ 9763-61 jaotab näiteks üldkasutatavad raadioelektronmõõteriistad kasutamisolude järgi viieks grupiks, kusjuures I grupp vastab umbes laboratooriumi oludele, aga V grupp kasutamisoludele välistingimustes. Vähem tuntud näitena toome tabelis 2.1.1 [11] USA sõjaväeaparatuuri liigitusest gruppidesse kasutamisolude järgi neli esimest gruppi. Need neli kergemat gruppi kaheksast annavad ettekujutuse sellest, milliseid suuri nõudmisi esitatakse kaasaja elektroonikaaparatuurile.

I grupi aparatuur töötab tingimustes, mis pole halvemad looduslikest; tüüpilisteks on detailid, mida kasutatakse portatiivses sideaparatuuris.

II gruppi kuulub täpne aparatuur, mida kasutatakse generaatorite häälestamisel või sageduse järelhäälestamise skeemides, kus elektriline stabiilsus on olulise tähtsusega.

III grupi aparatuur on laeva- ja maapealne elektroonikaaparatuur.

Tabel 2.1.1

USA sõjaväeaparatuuri liigitus gruppidesse kasutamisolude järgi

Kasutamisolude iseloomustus	I grupp	II grupp	III grupp	IV grupp
Temperatuur: töötamisel °C	—55 ... 55	—65 ... 85	—65 ... 125	—65 ... 125
hoidmisel °C	—65 ... 71	—65 ... 85	—65 ... 85	—65 ... 85
termolöök °C	Ei rakendata	—65 ... 85	—65 ... 125	—65 ... 125
Õhurõhk: töötamisel mm Hg	523	10,1	523	8,8
„ kõrgus m	3000	20 000	3000	30 000
töötamisel mitte tööoludes mm Hg	86	Andmed puuduvad	86	Andmed puuduvad
„ kõrgus m	15 000	Andmed puuduvad	15 000	Andmed puuduvad
Niiskus	100%-line suhteline niiskus koos kondenseerumisega			
Vibratsioon: sagedus Hz	10 ... 55	10 ... 2000	10 ... 55	10 ... 2000
kiirendus *g*	Andmed puuduvad	10	Andmed puuduvad	10
Löögid: kiirendus *g*	50	50	50	50
kestus ms	6	11	11	11
Soolane atmosfäär h	96	96	96	96
Vastupidavus hallitusele	Mittetoitev keskkond kõikides gruppides			
Teenistuskestus: töötamisel h	30 000	30 000	30 000	2000
hoidmisel, aastates	5	5	5	5

IV grupi aparatuur on mõeldud kasutamiseks kiirete lennukite pardal ning samuti rakettides «maa—õhk» ja «õhk—õhk».

2.2. Kasutamisolude mõju aparatuurile

Suur osa tõrgetest elektroonikaaparatuuris on põhjustatud ümbritseva keskkonna ja üldse kasutamisolude kahjulikust mõjust. Kahjustuste põhjuste analüüsimisel ja põhjuste kõrvaldamisel peame lähtuma konkreetsest olukorrast: milline on aparatuur, millistes oludes kasutatakse jne. Aparatuuri eri liikide suure arvu ja kasutamisolude paljude erinevate kombinatsioonide juures osutub kõikide võimalike kahjustuste üleslugemine võimatuks, samuti pole võimalik anda retsepte kõigi mõeldavate juhtumite jaoks (seda eriti käesoleva raamatu piiratud võimalustes). Kahjustuste põhjuse väljaselgitamine põhineb füüsikalis-keemiliste protsesside uurimisel, mis ühel või teisel juhul esinevad. Käesolevas paragrahvis piirdume ainult mõningate üldiste märkustega ja tüüpiliste kahjustustega ühtedel või teistel tingimustel.

Paljud aparatuuri kahjustavad tegurid mõjuvad tegelikult kogu aparatuuri kasutamise ajal. Kasutamisolude muutumine toob kaasa ainult protsessi intensiivsuse muutumise. Nimetame siinkohal näiteks metallipindade korrosiooni, mis reeglina intensiivistub õhuniiskuse suurenemisel, või elektriliste detailide nn. vananemise kiirenemist temperatuuri tõustes, milline ka ei oleks vananemisprotsessi füüsikalis-keemiline iseloom. Kahjustusprotsesside intensiivsus harilikult suureneb ka mitme teguri, näiteks niiskuse ja temperatuuri üheaegsel mõjumisel.

Tinglikult võiksime kahjustused liigitada pööratavaiks ja mittepööratavaiks. Isolatsioonimaterjalide pinnatakistuse vähenemist suurenenud niiskuses võib paljudel juhtudel lugeda pööratavaks, kuna niiskuse vähenedes ja pinna kuivades taastub takistuse esialgne väärtus. Metallpindade kahjustamine korrosiooni läbi on ilmselt mittepööratav nagu kõik vananemisprotsessid raadiodetailideski.

Tabelis 2.2.1 on antud lühike ülevaade tüüpilistest kahjustustest ühtede või teiste klimaatiliste või mehaaniliste tegurite mõjul.

Tabel 2.2.1

Tüüpilised kahjustused klimaatiliste ja mehaaniliste tegurite mõjul

Aparaadile mõjuv tegur	Esinevad nähtused	Lõppresultaat
1	2	3
Kõrge temperatuur	Materjalide pehmenemine	Struktuuriomaduste muutumine
	Keemiline lagunemine ja vananemine	Elektriliste parameetrite muutumine
	Aparatuuri ülekuumenemine	Elementide töökõlbmatuks muutumine, süttimine
	Õlide viskoossuse vähenemine	Laagrite töökõlbmatuks muutumine
	Metallide erinev paisumine	Liikuvate osade kinnikiilumine
	Raadiodetailide nominaalide muutumine	Lahkuhäälestumine, elementide rivist väljalangemine
Madal temperatuur	Materjalide rabedus	Mehaaniliste omaduste halvenemine, kaablite riknemine, vaha kõvastumine, kummi pragunemine jms.
	Õlide ja rasvade viskoossuse suurenemine	Laagrite ja lülitikontaktide kinnikleepumine
	Raadiodetailide temperatuuritegurite muutumine	Karakteristikute halvenemine
	Raadiodetailide karakteristikute muutumine	Elektrolüüt-alumiiniumkondensaatorite töökõlbmatuks muutumine, genereerimise puudumine kvartside ahelas, akumulaatoripatareide mahtuvuse muutumine
	Elementide erinev kokkutõmbumine	Laagrite liikuvuse vähenemine, kontaktpesade, releede jne. riknemine
	Kummitihendite kõvastumine	Suurenenud lekkekiirus hermetiseeritud aparatuuris
Suur niiskus	Niiskuse imendumine	Mõningate plastmassdetailide paisumine ja deformatsioon, elektriliste karakteristikute muutumine
	Veeauru kondenseerumine	Isolatsioonitakistuse muutumine, mis toob kaasa sädelemise ja elektrikaare

Tabeli 2.2.1 järg

1	2	3
	Metallide korrosioon	Mehaaniliste omaduste halvenemine. Teiste metallide mustumine korrosiooniproduktidega
	Vee kondenseerumine poolhermeetilises aparatuuris	Kõik ülaltoodu
Väike niiskus	Mõningate detailide ja materjalide liigkuivamine	Puu, naha, kangaste jms. liigkuivamine ja lagunemine
Kõrge õhurõhk	Mehaanilised pinged rõhu all hermetiseeritud aparatuuris	Mehaanilised vigastused, hermeetilisuse kadu
Madal õhurõhk	Õhu madal dielektriline vastupidavus	Elektrikaar kõrge pingega kohtades
	Mehaanilised pinged hermetiseeritud aparatuuris	Mehaanilised vigastused, hermeetilisuse kadu.
Päikesekiirgus	Materjali pinna vigastumine fotokeemilise efekti tagajärjel	Rabedus, eraldusvärvide tuhmumine
	Keemiliste protsesside kiirenemine	Vastupidavuse vähenemine rebimisele jms.
Tolm ja liiv	Liikuvate osade vahele tungimine	Laagrite, lülitite, potentsiomeetrite jms. vigastamine
	Staatiliste elektrilaengute suurenemine	Elektrilahendused ja elektrilised mürad
Putukad ja bakterid	Aparatuuri tungimine	Väikeste detailide, mõõteriistade jms. talitluse lakkamine
	Termiitide kallaletung	Plastmasskaablite või teiste orgaaniliste isolatsioonimaterjalide riknemine ja lühise tekkimine
Hallitus	Mädanemine, hallitusseente kasv	Optilise aparatuuri riknemine; leke kõrge impedantsiga skeemides; väikeste detailide kinnikiilumine jms.; kõigi orgaaniliste materjalide mehaanilise tugevuse vähenemine
Vette kastmine	Metallide korrosioon	Struktuuriomaduste muutumine, detailide kinnikiilumine, korrosiooniproduktidega mustumine

1	2	3
	Keemiliste omaduste halvenemine	Materjalide lahustumine ja nende omaduste halvenemine
	Kõrge rõhk	Mehaanilised vigastused
Soolased pritsmed	Metallide korrosioon	Mehaaniliste omaduste muutumine, eriti kõrgel magneesiumisisaldusel ja erinevate metallidega kokkupuutumisel
Tugev tuul	Mehaanilised pinged antennides	Mehaanilised vigastused
Vibratsioon ja löögid	Metalli ja klaasi jootekohtade halvenemine, kütteniidi vigastus	Elektrovaakuumseadiste kõlbmatuks muutumine
	Mehaaniliste ühenduste lõdvenemine	Detailide lahtitulek ja riknemine
	Ühendusjuhtmete murdumine, takistite ja kondensaatorite väljaviikude murdumine	Skeem lakkab töötamast
	Mehaanilised nihked elektromehaanilistes detailides	Lahkhäälestus

2.3. Raadiodetailide töökindlus

Aparatuuris kasutatavaid detaile võib liigitada kahte suurde ossa: elektrilisteks ja elektromehaanilisteks. Elektrovaakuumseadised, pooljuhtseadised, takistid, kondensaatorid, trafod, paispoolid, induktiivpoolid, indikaatorlambid jne. kuuluvad elektriliste detailide hulka. Elektromehaanilisteks detailideks tuleb pidada releesid, tumblereid, ketaslüliteid, klahvlüliteid, lambipesasid, aga ka pöördkondensaatoreid, trimmereid, potentsiomeetreid ja elektrimõõteriistu (osutriistu). Elektrilised detailid peaaegu täielikult ning elektromehaanilised detailid suurelt osalt kuuluvad mittetaastatavate toodete hulka ja sellepärast mõistame nende töökindluse all nende tõrketust.

Kõige enam kasutatavaks detailide tõrketusparameetriks on tõrkeintensiivsus. Seda mõistet kasutatakse aparatuuri tõrketuse arvutamiseks detailide järgi; ka enamik

käsiraamatuid annab konkreetsete detailide tõrketuse iseloomustamiseks nende tõrkeintensiivsuse väärtused, kusjuures töötamist mõõdetakse ajaühikutes (tundides). Kuid terve rea elektromehaaniliste detailide, näiteks releede ja lülitite töötamist iseloomustab mitte niivõrd aeg, kuivõrd töötsüklite (tõmbumiste, lülimiste) arv. Nende jaoks antakse siis ka tõrkeintensiivsus mitte ühikutes $\frac{1}{\text{h}}$, vaid $\frac{1}{\text{tsükkel}}$. Kuna aparatuuris kasutatakse kõrvuti nii detaile, mille töötamise kestust mõõdetakse tundides, kui ka detaile, mille puhul kasutatakse tsüklite arvu, toome lihtsa üleminekuvalemi ühelt ühikult teisele. Kui tsüklid korduvad t sekundi tagant, siis

$$\lambda = \frac{3600\,\lambda'}{t}, \qquad (2.3.1)$$

kus λ on ühikutes $\frac{1}{\text{h}}$, λ' ühikutes $\frac{1}{\text{tsükkel}}$.

Detailide tõrkeintensiivsuste väärtused määratakse katseliselt. Reeglina on tõrkeintensiivsus detaili «elu» erinevatel momentidel erinev, s. t. tõrkeintensiivsus sõltub ajast. Kui joonistada funktsiooni $\lambda = f(t)$ graafik, võib graafiku kuju olla kõige erinevam, võivad esineda tõusud, langused, horisontaalsed sirglõigud, kühmud jne. Üks paljudest võimalustest oli näidatud joonisel 1.1.5. Joonisel 1.1.5 toodud graafiku kuju on väga paljudel juhtudel tüüpiline.

Siinkohal juhime lugeja tähelepanu järgmisele asjaolule. Kui detaili tõrkeintensiivsuse katselise määramise eesmärgiks on detaili tõrketuse muutumise seaduspärasuste väljaselgitamine ning saadud tulemuste kasutamine detaili konstruktsiooni või valmistamistehnoloogia parandamiseks, tuleb tõrkeintensiivsuse graafik välja joonistada võimalikult täpselt kõigi esinevate iseärasustega. Iseärasuste analüüs võimaldab kindlaks määrata töökindluse suurendamiseks vajalikud abinõud. Kui aga katsete eesmärgiks oli ainult tõrkeintensiivsuse mõõtmine või mõõtmistulemuste kasutamine edasistes teoreetilistes uurimistes, püütakse eksperimentaalset kõverat aproksimeerida mõne analüütiliselt võimalikult lihtsa kõveraga.

Nagu juba öeldud, on joonisel 1.1.5 toodud tõrkeintensiivsuse graafiku kuju iseloomulik väga paljudele raadio-

detailidele. Graafikul võib täheldada kolme iseloomulikku osa. Ajavahemikus $(0, t_1)$ tõrkeintensiivsus väheneb, vahemikus (t_1, t_2) on tõrkeintensiivsus konstantne ja pärast momenti t_2 hakkab tõrkeintensiivsus jälle suurenema. Enamiku detailide jaoks moodustab vahemik $(0, t_1)$ 10... 200 tundi, vahemik $(0, t_2)$ seevastu 5000... 10 000 tundi või veelgi rohkem. Sellel tõrkeintensiivsuse graafikul on suur sarnasus demograafias tohutu suure statistilise materjali läbitöötamise tulemusena leitud kõveraga, mis iseloomustab inimeste suremust erinevatel eluaastatel. Lapseeas täheldatakse suuremat suremust, keskeas on suremus väiksem ning erinevate eluaastate jaoks enamvähem ühesugune, kusjuures surma põhjusteks on õnnetusjuhtumid ja mitmesugused haigused. Vanadusperioodil suremus suureneb ning kuigi surm tuleb juhuslikel silmapilkudel, on surma põhjuseks seaduspärased füsioloogilised muutused inimese organismis.

Ajavahemiku $(0, t_1)$ nimetatakse sissetöötamisperioodiks. Suurema tõrkeintensiivsuse põhjuseks detailide sissetöötamisperioodil on varjatud sisemiste defektidega detailide olemasolu nõuetele vastavate raadiodetailide seas. Võime ette kujutada, et N detaili seas on N' tehnilistele tingimustele vastavat detaili tõrkeintensiivsusega λ' ja N'' varjatud sisemiste defektidega detaili tõrkeintensiivsusega λ'', kusjuures λ'' on tunduvalt suurem kui λ'. Suure erinevuse tõttu tõrkeintensiivsuse väärtustes muutuvad varjatud defektidega detailid kiiresti kõlbmatuks ja alles jäävad tehnilistele tingimustele vastavad detailid, kus tõrked esinevad suhteliselt harvemini. Võib näidata, et ajamomendil $t = 0$ on tõrkeintensiivsus $\frac{N'}{N}\lambda' + \frac{N''}{N}\lambda''$, edasi tõrkeintensiivsus väheneb eksponentsiaalselt ja sissetöötamisperioodi lõpul saab tõrkeintensiivsus konstantse väärtuse λ'.

Vahemikku (t_1, t_2) nimetatakse normaalse töö perioodiks ning iseloomustavaks on siin tõrkeintensiivsuse konstantsus. Teame, et konstantse tõrkeintensiivsuse puhul tekib seda rohkem tõrkeid, mida rohkem on vaatlusaluseid detaile ja mida pikem on vaadeldav ajavahemik. Mis puutub tõrgete tekkimise füüsikalistesse põhjustesse, siis nendeks on mitmesugused juhuslikud sisemiste pingete ja väliste koormuste kontsentratsioonid, mis viivad detaili purunemiseni. Väide, et tõrkeid tekib seda rohkem,

mida rohkem on vaatlusaluseid detaile ja mida pikem on vaadeldav ajavahemik, ei tähenda tegelikult midagi muud kui seda, et me tõrgete tekkimise füüsikalistest põhjustest mitte midagi ei tea või teame äärmiselt vähe. Kindlaks tehes mingi tõrgete tekkimise põhjuse, teiste sõnadega, leides täpsema seaduspärasuse tõrgete tekkimises, kanname need tõrked puhtjuhuslike tõrgete kategooriast (normaalse töö perioodil) üle näiteks vananemise tagajärjel tekkinud tõrgete kategooriasse või lihtsalt kõrvaldame tõrke tekkimise põhjuse.

Perioodil pärast ajamomenti t_2 ilmnevad tõrgetena mitmesugused detailides toimuvad füüsikalised ja keemilised vananemis- ja kulumisprotsessid. Vananemist ja kulumist, s. t. detaili parameetrite muutumist, tuleks ette kujutada kui parameetrite tendentsi muutuda mingis kindlas suunas enam või vähem kindla kiirusega, kui juhuslikku protsessi, mille keskväärtus muutub kindlas suunas teatud kiirusega ja mille ümber on hajunud üksikute detailide parameetrite vananemiskõverad. Kogemused (eriti masinaehituses) näitavad, et vananemise ja kulumise tagajärjel tekkinud tõrked on enamasti jaotunud normaalselt. Nagu nägime eespool (vt. § 1. 2.), täheldatakse just tõrketu tööaja normaaljaotuse korral tõrkeintensiivsuse järsku tõusu teatud ajamomendist alates.

Paljude raadiodetailide (mitte eriti täpsed takistid ja kondensaatorid) puhul ei jõua me praktiliselt mitte kunagi momendini t_2 (normaalse töötamise perioodi lõpuni), kuna aparatuur, kus need detailid asetsevad, vananeb moraalselt varem. Teisest küljest on mõnede raadiodetailide (täpsete takistite, võimenduslampide) normaalse töö periood niivõrd kokku surutud, et kõne alla tulevad ainult normaalselt jaotunud vananemise ja kulumise tagajärjel tekkinud tõrked.

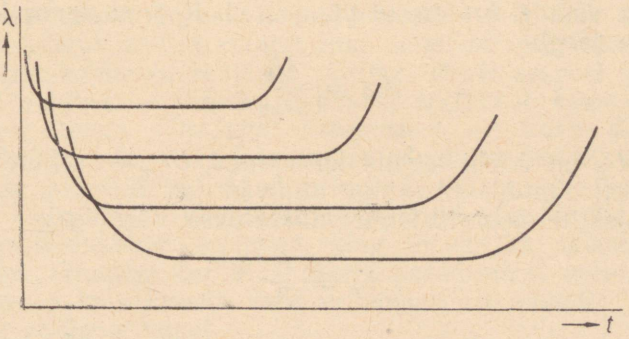
Vaatleme nüüd sissetöötamis-, normaalse töö ja vananemisperioodi järskude ja aeglaste tõrgete seisukohalt. Pole raske mõista, et vananemisperioodi tõrked kujutavad endast peamiselt aeglasi tõrkeid. Seevastu normaalse töö perioodi tõrked ja tõrked sissetöötamisperioodil on peamiselt järsud tõrked.

Ei tule muidugi arvata, et kõikide detailide tõrkeintensiivsuse graafikutel on langev osa algperioodil, siis abstsissteljega paralleelne osa ja lõpuks järsult tõusev

osa. Ka ei saa tõrkeintensiivsuse matemaatilisel käsitlusel mitte alati normaalse töötamise perioodi lähendada tööaja eksponentjaotusega ega vananemisperioodi normaaljaotusega. Ka võib mõni neist kolmest perioodist puududa. Viimase aja praktikas ilmneb püüe «treenida» detaile enne aparatuuri monteerimist, s. t. välja selgitada ja kõrvaldada kasutamiselt varjatud, sisemiste defektidega detailid.

Tõrkeintensiivsuse väärtus mingil kindlal ajamomendil, samuti nagu tõrkeintensiivsuse graafiku kujugi, sõltub detaili koormusest. Raadiodetailide koormust käsitleme me kõige üldisemas mõttes, mõistes koormuse all nii elektrilist kui ka soojuslikku ja mehaanilist koormust. Koormuse suurenedes nihkub graafik vasakule ja üles, teiste sõnadega, tõrkeintensiivsuse väärtus suureneb igal ajamomendil, sissetöötamisperioodi kestus väheneb, lüheneb ka normaalse töö perioodi kestus ning sellega koos ka tehniline ressurss. Koormuse muutumisel esinev tõrkeintensiivsuse graafiku tüüpiline muutumine on näidatud joonisel 2. 3. 1. Sissetöötamisperioodi lühenemine koormuse kasvades võimaldab sooritada nn. sissekütmist detaile tootvates tehastes lühema ajaga, kasutades selleks näiteks detailidele rakendatud pingete suurendamist või sissekütmist ümbritseva õhu kõrgemal temperatuuril.

Ülaltoodust selgub ka üks põhjus, miks erinevates käsiraamatutes tuuakse ühesuguste detailide jaoks erinevad tõrkeintensiivsuse väärtused. Reeglina ei konkretiseerita käsiraamatutes detailide katsetamis- või kasu-



Joon. 2. 3. 1. Tõrkeintensiivsuse muutumine koormuse muutudes

tamisolusid. Katsete või ekspluatatsiooniliste andmete põhjal arvutatud detailide tõrkeintensiivsus on erinevates oludes loomulikult erinev.

Koormuse iseloomustamiseks kasutatakse koormusteguri mõistet. Definitsiooni järgi on koormustegur detailile mõjuva (faktilise) koormuse suhe nimikoormusega; nimikoormus on määratud standardiga, kasutamisjuhenditega või teiste vastavate dokumentidega. Olenevalt detailist võib koormuse all mõista erinevaid elektrilisi ja mehaanilisi suurusi. Takisti koormus näiteks määratakse takistil eralduva võimsusega, kondensaatori koormus rakendatud pingega. Tuleb silmas pidada ka seda, et real juhtudel võib detaili iseloomustada mitme, väärtuse poolest erineva koormusteguriga sõltuvalt sellest, kas vaadeldav koormus on elektriline, mehaaniline või soojuslik. Ka võib näiteks takistite suure nimiväärtuse korral, kui limiteerivaks on mitte takistil eralduv võimsus, vaid rakendatud pinge, mõista koormusteguri all rakendatud pinge ja maksimaalselt lubatud pinge suhet, s. t. elektrilist koormustegurit võib tõlgitseda mitmeti olenevalt konkreetsetest iseärasustest.

Nii määrataksegi elektronlampidele kaks koormustegurit. Elektroodide koormustegur K_{k1} leitakse valemiga:

$$K_{k1} = \frac{P_a + P_v}{P_{ao} + P_{vo}},$$

kus P_a on anoodil ja P_v võredel tegelikult eralduv võimsus. P_{ao} ja P_{vo} on vastavalt maksimaalselt lubatud anoodil ja võredel eralduvad võimsused. Koormustegur küttepinge järgi:

$$K_{k2} = \frac{U_k}{U_{ko}},$$

kus U_k on lambi tegelik küttepinge, U_{ko} — sellele lambile ettenähtud küttepinge nimiväärtus.

Takistite koormustegur määratakse valemiga:

$$K_k = \frac{P}{P_0},$$

kus P on takistil faktiliselt eralduv võimsus, P_o aga nimivõimsus.

Kondensaatorite koormustegur on faktiliselt rakendatud pinge U ja nimipinge U_0 suhe:

$$K_k = \frac{U}{U_0}.$$

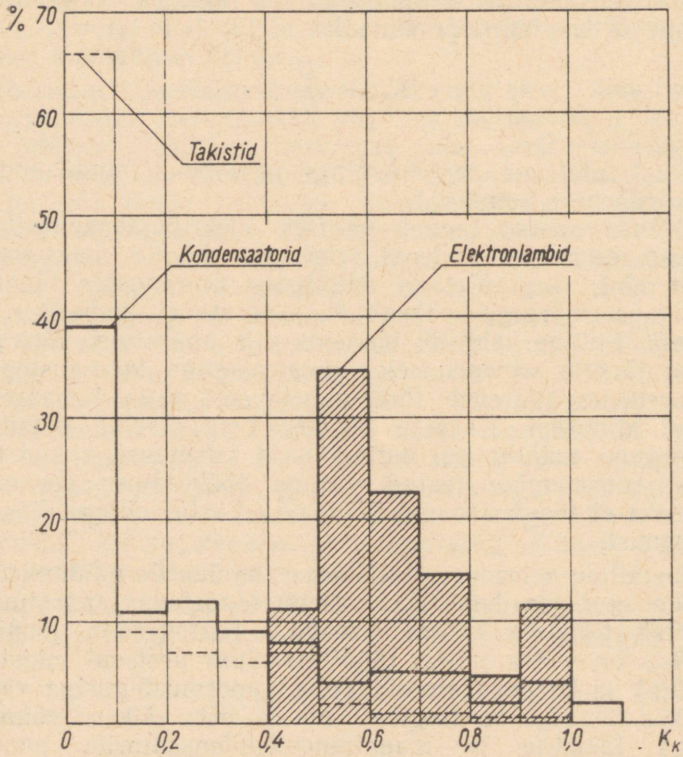
(U all tuleb mõista alalispinge ja vahelduvpinge amplituudväärtuse summat.)

Mõned aastad tagasi valitses elektroonikaaparatuuri konstrueerimisel tendents koormata detaile maksimaalselt ning isegi ületada tehnilistes tingimustes lubatud piire eesmärgiga vähendada aparatuuri gabariite ja kaalu. Selline kahjulik tendents viis aparatuuri töökindluse järsule vähenemisele, kuna reeglina koormusteguri suurenedes suureneb tõrkeintensiivsus mitte lineaarselt, vaid kiiremini. Kaasaja konstruktorid otsivad detailide koormuse määramisel optimaalseid lahendusi, kus detailide koormamine teatud varuga töökindluse parandamiseks ei too kaasa gabariitide ja kaalu lubamatut suurenemist.

Detailide koormuse statistiline analüüs on näidanud, et väga suur osa detailidest praegu toodetavas aparatuuris töötab tunduva koormusvaruga. Histogramm joonisel 2. 3. 2. on selles mõttes tüüpiline. Suur protsent takisteid (70%) ja kondensaatoreid (40%) koormusteguriga vahemikus 0 ... 0,1 on tingitud ilmselt eriti väikese võimsusega takistite ja madalpingekondensaatorite puudumisest.

Ettekujutuse saamiseks erinevate detailide tõrkeintensiivsuse suurusjärgust toome joonise 2. 3. 3 [29]. Nagu näha, kõigub teatud kindlat liiki detailide tõrkeintensiivsus kahe-kolme suurusjärgu piirides. Peale eespool nimetatud põhjuse — tõrkeintensiivsuse sõltuvuse kasutamisoludest, teiste sõnadega, koormusest — tuleb silmas pidada ka seda, et näiteks «võimenduslampide» all mõistetakse paljusid tüüpe, et erinevate tehaste ja firmade poolt valmistatud ühetüübilised detailid võivad olla tõrketuse seisukohalt erinevad, ning lõpuks ka asjaolu, et tehnika arenedes detailide tõketusparameetrid muutuvad paremaks, mis kutsub esile erinevuse eri aastatel avaldatud andmete vahel.

Üksikasjalikumad andmed detailide kohta on koondatud lisasse V [21]. Üksikute detailide tõrkeintensiivsuse kohta



Joon. 2. 3. 2. Detailide jaotus koormuse järgi

on toodud nii keskmised kui ka maksimaalsed ja minimaalsed väärtused.

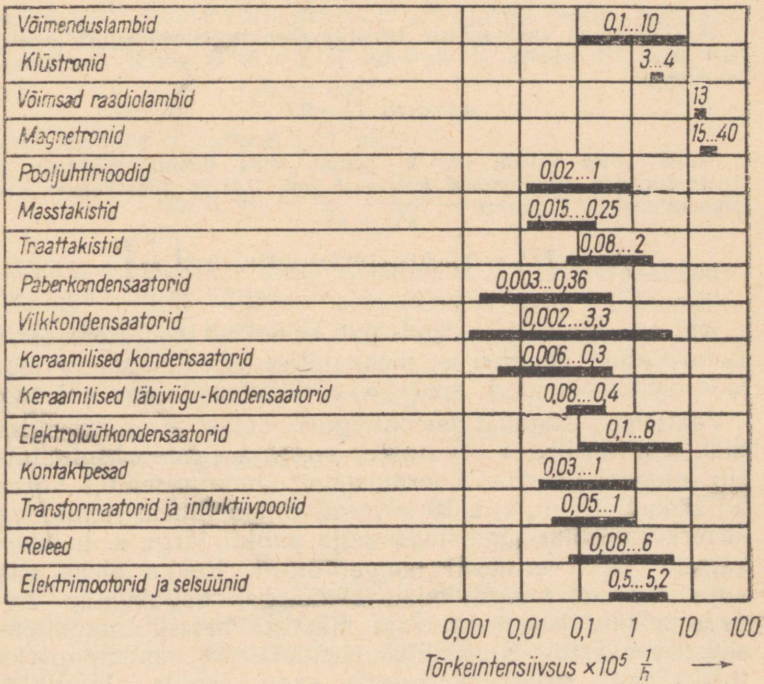
Detailide tõrkeintensiivsus sõltub kasutamisoludest, nende elektrilisest, mehaanilisest ja soojuslikust koormusest. Reeglina kasvab tõrkeintensiivsus rakendatud pingete, eralduva võimsuse, ümbritseva õhu temperatuuri, mehaanilise vibratsiooni ja löökide kiirenduse suurenedes. Lihtne ja praktikas läbilöönud moodus tõrkeintensiivsuse kirjeldamisel, sõltuvalt erinevatest koormustest, on järgmine: tähistame tõrkeintensiivsuse nimikoormusel ($K_k = 1$) ja standardsel temperatuuril (20° C) λ_0-ga. Olgu $\lambda(K_k, T)$ tõrkeintensiivsus koormusteguri väärtuse K_k ja temperatuuri T° C juures. Seos $\lambda(K_k, T)$ ja λ_0 vahel:

$$\lambda(K_k, T) = a(K_k, T)\lambda_0, \qquad (2.3.2)$$

kus $a\ (K_k, T)$ on nn. ekspluatatsioonitegur, mida võime kirjutada nii:

$$a(K_k, T) = \frac{\lambda(K_k, T)}{\lambda_0}.$$

Ekspluatatsioonitegur näitab, mitu korda muutub tõrkeintensiivsus koormusteguri väärtuse muutumisel 1-st kuni K_k-ni ja temperatuuri muutumisel 20° C-st T-ni. Ekspluatatsioonitegur $a(K_k, T)$ tuleb määrata katseliselt. Mõnede detaililiikide jaoks on ekspluatatsioonitegurid sõltuvus koormustegurist ja ümbritseva õhu temperatuurist T näidatud joonistel lisas V [21].



Joon. 2.3.3. Detailide tõrkeintensiivsus

Näide 2.3.1

Leida takisti МЛТ-0,5-4,7k tõrkeintensiivsus aparatuuris, mida kasutatakse laboratoorsetes tingimustes, kui pinge takistil on 30 V ja takistit ümbritseva õhu temperatuur 60° C.

Lahendus.

Takisti МЛТ on metalliseeritud lakitud takisti. Tabelist lisas V leiame, et takisti МЛТ keskmine tõrkeintensiivsus (kui aparatuuri kasutatakse laboratooriumides) nimikoormusel ja toatemperatuuril on $0{,}03 \cdot 10^{-6} \left[\frac{1}{\text{h}}\right]$.

Leiame koormusteguri K_k väärtuse. Takistil eralduv võimsus

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{30^2}{4700} \cong 0{,}2 \text{ W}.$$

Siit koormustegur

$$K_k = \frac{P}{P_0} = \frac{0{,}2}{0{,}5} = 0{,}4.$$

МЛТ-tüüpi ja analoogiliste takistite ekspluatatsiooniteguri graafikust lisas VI leiame, et $K_k = 0{,}4$ ja $T = 60°\,\text{C}$ korral ekspluatatsioonitegur

$$a = a(K_k, T) = 0{,}7.$$

Nüüd võime valemi (2.3.2) põhjal leida tõrkeintensiivsuse λ laboratoorsetes tingimustes koormusteguri 0,4 ja ümbritseva õhu temperatuuri 60° C korral:

$$\lambda = a(K_k, T)\lambda_0 = 0{,}7 \cdot 0{,}03 \cdot 10^{-6} = 0{,}021 \cdot 10^{-6}\left[\frac{1}{\text{h}}\right].$$

Kui aparatuuri kasutamisolud erinevad laboratoorsetest (suurenenud õhuniiskus, mehaanilise vibratsiooni ja löökide olemasolu jne.), suureneb tõrkeintensiivsuse väärtus.

Vaatleme ekspluatatsiooniteguri katselise määramise mahtu. Praktilistes arvutustes on vaja teada ekspluatatsiooniteguri väärtusi koormusteguri muutmisel 0,1 võrra 0,1-st kuni 1,0-ni, s. t. 10 kõverat. Enam-vähem rahuldava kõvera saaksime joonistada nelja punkti järgi, s. t. tehes katseid neljal erineval temperatuuril. Kokku oleks siis vaja leida 40 punkti, teiste sõnadega, neljakümne erineva režiimi juures on vaja määrata detaili tõrkeintensiivsuse väärtus. Statistilise usaldatavuse saavutamiseks tuleks igas grupis katsetada sadu detaile. Järelikult kujuneb katsete maht õigustamatult suureks. Seepärast

võib osutuda otstarbekohaseks määrata näiteks tõrkeintensiivsuse sõltuvus temperatuurist kindla koormusteguri korral ja sõltuvus koormustegurist kindlal temperatuuril. Eksperimentaalselt leitud sõltuvusi võib siis aproksimeerida matemaatiliselt lihtsa valemi abil, määrates katsetest vaid selle matemaatilise sõltuvuse parameetri. Kogemused näitavad, et sageli on otstarbekohane aproksimeerimiseks kasutada funktsiooni

$$a(K_k, T) = K_k{}^n A^{T-T_0}, \qquad (2.3.3)$$

kus eksperimentaalselt määratakse astmenäitaja n ja astme alus A; T_0 on standardne temperatuur 20° C. Sõltuvalt detaili tüübist on A väärtus harilikult vahemikus (1,02, 1,15) ja n väärtus vahemikus (4, 10).

Parameetrite A ja n määramiseks toimitakse järgmiselt: katseliselt määratakse tõrkeintensiivsus nimikoormusel ja standardsel temperatuuril. Nii määratakse λ_0. Edasi määratakse tõrkeintensiivsus mingil teisel temperatuuril T_1, kuid nimikoormusel $K_k = 1$. Siis

$$\lambda_1 = \lambda_0 A^{T_1-T_0},$$

kust leitakse parameetri A väärtus

$$\log A = \frac{\log \lambda_1 - \log \lambda_0}{T_1 - T_0}.$$

Edasi määratakse tõrkeintensiivsus λ_2 standardsel temperatuuril, kuid näiteks maksimaalsest kaks korda väiksema koormuse juures. Võime kirjutada, et

$$\lambda_2 = \lambda_0 \left(\frac{1}{2}\right)^n,$$

kust määrame astmenäitaja n:

$$n = \frac{\log \lambda_2 - \log \lambda_0}{\log 0{,}5}.$$

Teades A ja n väärtusi, võime joonistada ekspluatatsioonigeturi kõverate perekonna, mida saab kasutada aparatuuri tõrketuse arvutamisel detailide tõrkeparameetrite järgi.

Mõnikord tuleb detaili tõrkeintensiivsuse leidmiseks

kasutada mitut erinevat ekspluatatsioonitegurit. Näiteks võimenduslampide korral

$$\lambda = a_1 a_2 \lambda_0,$$

kus a_2 sõltub koormustegurist küttepinge järgi, aga a_1 koormustegurist teistel elektroodidel eralduva võimsuse järgi ning ümbritseva õhu temperatuurist.

Nagu teame, liigituvad detailide tõrked järskudeks ja aeglasteks, kusjuures aeglaste tõrgete osatähtsus, eriti täpses mõõteaparatuuris, on võrdne või isegi suurem järskude tõrgete osatähtsusest. Samuti teame, et järskude ning aeglaste tõrgete tekkimise põhjused on erinevad ning sõltumatud. Kui järskude tõrgete põhjuseks on sisemiste pingete ja välise koormuse juhuslik suurenenud kontsentratsioon, siis aeglased tõrked tekivad füüsikaliste ja keemiliste vananemis- ja kulumisprotsesside tagajärjel. Need asjaolud lubavad detaili tõrkeintensiivsust λ vaadelda järskude tõrgete intensiivsuse λ_j ja aeglaste tõrgete intensiivsuse λ_a summana:

$$\lambda = \lambda_j + \lambda_a. \qquad (2.3.4)$$

Selline käsitlusviis on osutunud väga otstarbekaks. Järskude tõrgete intensiivsuse λ_j võib enamikul juhtudel lugeda konstantseks. Aeglasi tõrkeid käsitleme kolmandas peatükis.

2.4. Aparatuuri tõrketusparameetrite arvutamine detailide tõrketusparameetrite järgi

Elektroonikaaparatuuri väljatöötamisel esineb olukordi, kus on vajalik hinnata sellise aparatuuri tõrketusparameetreid (näiteks keskmist tõrketut tööaega), mida alles hakatakse konstrueerima või mis on olemas ainult paberil kas siis blokkskeemina või ligikaudse elektrilise skeemina. Selline olukord tekib näiteks tehnilise ülesande koostamisel uue aparatuuri loomiseks. Reeglina nõuavad tellijad, et tehniline ülesanne sisaldaks tõrketusparameetrite minimaalselt vastuvõetavaid väärtusi. Tellimuse täitjal, konstrueerimisbürool, tuleb analüüsida tellija tingimuste täidetavust, kusjuures lihtsaim moodus selleks on lähtuda juba toodetava analoogilise aparatuuri tõrketusparameetritest. Kui võrdluse tulemusena selgub,

et tellitav aparatuur peab töökindluselt olema tunduvalt parem olemasolevast, peab tellimuse täitja oskama orienteeruvalt määrata tööjõumahu ja väljatöötamismaksumuse suurenemise, mis võib osutuda vajalikuks töökindluse suurendamiseks. Vaatleme, kuidas on võimalik ülalkirjeldatud probleemile lahendust leida.

Statistiline analüüs näitab, et elektroonikaaparatuuri kindlas liigis esinevad raadiodetailid enam või vähem püsivates vahekordades. Tabelis 2. 4. 1 on toodud andmed protsentides üksikute detaililiikide esinemise kohta raadiolokatsiooni- ja raadionavigatsiooniaparatuuris, saatevastuvõtuaparatuuris, vastuvõtuaparatuuris ja automaatjuhtimise süsteemides. Oletame, et üldse on aparatuuris kasutamisel n eriliiki detaile (elektronlampe, transistore, kondensaatoreid, takisteid, trafosid jne.). Olgu i-nda liigi detailide keskmine tõrkeintensiivsus $\bar{\lambda}_i$ ja esinemissagedus $p_i (0 < p_i < 1)$. Võime leida kõigi detailide keskmise tõrkeintensiivsuse:

$$\bar{\lambda} = p_1\bar{\lambda}_1 + p_2\bar{\lambda}_2 + \ldots + p_n\bar{\lambda}_n = \sum_{i=1}^{n} p_i\bar{\lambda}_i.$$

Niiviisi määratud detailide üldine keskmine tõrkeintensiivsus $\bar{\lambda}$ on harilikult aparatuuriliikide jaoks teada. Kasutades valemit (1. 3. 8)

$$T_k = \frac{1}{n\bar{\lambda}},$$

on võimalik leida projekteeritava aparatuuri keskmine tõrketu tööaeg T_k juhul, kui teaksime detailide arvu n projekteeritavas aparatuuris.

Detailide arvu n võib ligikaudselt määrata võrreldes projekteeritavat aparatuuri analoogilise olemasolevaga. Veidi täpsema tulemuse saab järgmiselt. Tehnilise ülesande koostamisel (jutt on muidugi mitte eriti keerulisest aparatuurist, näiteks raadioelektronmõõteriistad, raadiovastuvõtjad, televiisorid jne.) on teada aparatuuri blokkskeem ja sealt ka elektronlampide ja transistoride ligikaudne arv k. Teisest küljest on statistilisest analüüsist teada, mitu muud liiki detaili (takistit, kondensaatorit, trafot jne.) tuleb keskmiselt ühe elektronlambi või transistori kohta. Diagrammil joonisel 2. 4. 1 on andmed teatud raadioelektronmõõteriistade liikide kohta. Tähis-

Tabel 2.4.1

Detailide protsentuaalne sisaldus seadmeis

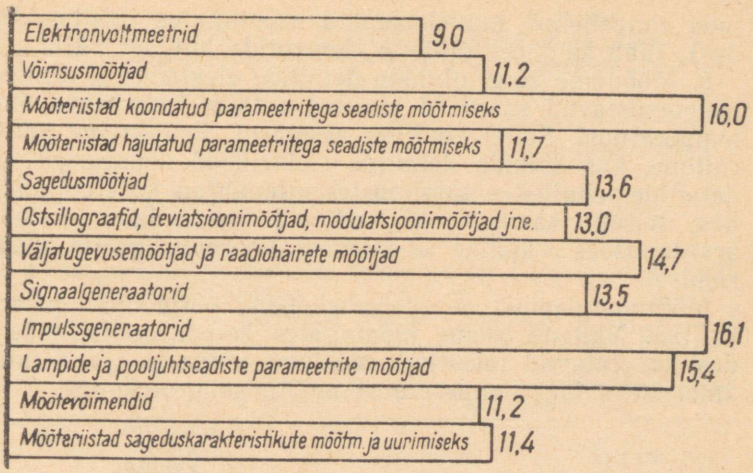
Detail	Detailide sisaldus protsentides			
	Lennukite lokatsiooni- ja navigatsiooniseadmeis	Saate-vastuvõtuaparatuuris	Vastuvõtuaparatuuris	Automaatjuhtimise süsteemides
Elektrovaakuumseadeldised	5...12	3...6	3...8	1...6
Pooljuhtseadmed	0...14	0...4	0...2	4...16
Kondensaatorid	20...32	37...52	41...61	11...15
Takistid	37...51	22...31	16...28	19...26
Transformaatorid ja paispoolid	3...14	4...12	0...8	3...6
Induktiivpoolid, filtrid, viiteliinid	1...14	3...10	8...22	0,2...0,6
Releed	0...3	0...5	0...4	0,5...2
Selsüünid, elektrimootorid, muundurid	0...3	0...2	0...0,5	1...3
Elektrimõõteriistad	0...3	0...2	0...0,6	0,2...1
Valgustus- ja indikaatorlambid	0...4	0...1,1	0...0,5	7...25
Seleen- ja kuproksalaldid	0...3	0...0,8	0...1,2	0,1...7
Kaitsmed	0,2...5	0,3...0,9	0,3...0,6	13...21
Lülitid	—	—	—	1...5

tame muud liiki detailide keskmise arvu ühe lambi või transistori kohta tähega l. Siis

$$n = k(l + 1).$$

Kui on teada ligikaudne elektriline skeem, lihtsustub n määramine veelgi ja me leiame ta lihtsalt detailide loendamisega skeemis.

Nagu ülaltoodud arutlustest näha, on selline aparatuuri keskmise tõrketu tööaja määramise viis vägagi ligikaudne. Kuid ta aitab kiiresti hinnata tellija poolt tõrketuse kohta esitatud nõudmiste reaalsust. Tuleb arvestada seda, et niimoodi leiame arvu, mis iseloomustab tõrketuse keskmist taset ja sedagi umbes paariaastase mahajäämusega, kuna statistilised andmed vananevad. Tuleb arvestada ka, et kirjeldatud viis sobib ainult reserveerimata aparatuuri jaoks.



Joon. 2.4.1. Ühele vaakuumseadeldisele (transistorile) vastav keskmine teiste raadiodetailide arv

Nagu nägime eelmises paragrahvis, sõltub detailide tõrkeintensiivsus oluliselt nende kasutamisoludest, eeskätt elektrilisest ja soojuslikust režiimist. Kirjeldatud ligikaudne moodus aparatuuri tõrketu tööaja leidmiseks ei arvesta mingil viisil detaili kasutamise konkreetseid tingimusi. Eeldati, et detailide soojuslikud ja elektrilised režiimid ei erine väljakujunenud keskmistest režiimidest. Kuid detailide elektrilise ja soojusliku koormuse vähendamisega on võimalik tunduvalt suurendada aparatuuri tõrketust.

Kui projekteerimisel on jõutud nii kaugele, et on loodud tulevase seadme töötavad maketid, siis nendel on juba võimalik mõõta detailide elektrilist koormust ja temperatuuri, samuti täpsemalt määrata aparatuuri detailide arv. Sel juhul on võimalik teha töökindluse täpsustatud arvutus, mille käiku vaatleme järgnevalt.

a. Määrame kindlaks aparatuuri tõrketuse seisukohalt olulised detailid, s. t. detailid, mille tõrge kutsub esile aparatuuri tõrke. Oluliste detailide hulgast jäävad välja näiteks raadiovastuvõtjate skaalavalgustuslambid, signaallambid mõõteriista esiplaadil jms. Kui detail kuulub tõrke tekkimisel kiirele vahetamisele (näiteks sulavkaits-

med toiteahelas, kuivelemendid mõningates mõõtesildades), jääb ka tema oluliste elementide hulgast välja.

b. Mõõdame kõigi oluliste detailide elektrilist koormust iseloomustavad suurused ja neid detaile ümbritseva õhu temperatuuri. Sellel on kaks eesmärki. Esiteks me kontrollime, kas kõikide detailide elektrilised koormused on detailide tehnilistes tingimustes ettenähtud lubatud piirides; teiseks saame neid andmeid kasutada tõrketuse arvutamiseks vajalike elektriliste koormustegurite määramisel.

Mõõtmistulemusi on otstarbekohane vormistada protokollina. Näitena toome mõningates konstrueerimisbüroodes kasutatavad takistitel eralduva võimsuse ja detaile ümbritseva õhu temperatuuri mõõtmise protokollid.

Kinnitan
Töökindluslaboratooriumi
juhataja

.....

«.....» ..... 196..... a.

Aparatuuri takistitel eralduva võimsuse mõõtmise protokoll

1. Tüüp ..... Makett nr. .....
2. Toitevõrgu pinge 220 V.
3. Mõõdeti järgmiste mõõteriistadega:
   a) ....., tüüp ..... Nr. .....
   b) ....., tüüp ..... Nr. .....
   c) ....., tüüp ..... Nr. .....

Jrk. nr.	Takisti nr. põhimõtteskeemil	Takisti tüüp	Takisti nimiväärtus	Pinge takistil		Eralduv võimsus		Koormustegur
				Lubatud	Tegelik	Lubatud	Tegelik	

Mõõtis ..... /...../

Vastutav insener ..... /...../

«.....» ..... 196..... a.

Kinnitan
Töökindluslaboratooriumi
juhataja

.....

«.....» ..... 196..... a.

Aparatuuri soojusrežiimi mõõtmise protokoll

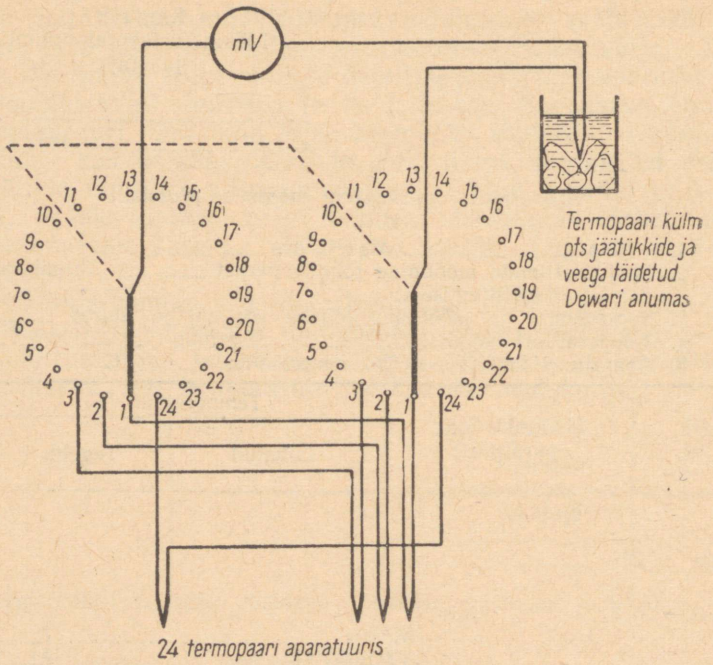
1. Tüüp ..... Makett nr. .....
2. Soojusrežiimide mõõtmine toimus pärast ..... tunni möödumist sisselülitamisest
3. Soojenemine ja mõõtmine toimus võrgupinge juures V
4. Temperatuuri mõõdeti ....., tüüp ....., N .....
5. Aparatuuri ümbritseva õhu temperatuur ..... °C

Jrk. nr.	Mõõtmise koht aparatuuris	Temperatuur °C	
		Lubatud	Tegelik

Mõõtis ..... /...../
Vastutav insener ..... /...../
«.....» ..... 196..... a.

Detailide temperatuuri on küllaldane mõõta paarikraadise täpsusega. Elektronmõõteriistade korral osutub vajalikuks temperatuuri üheaegne mõõtmine mitmekümnes kohas aparatuuri sees. Mõõtmiste lihtsustamiseks koondatakse harilikult detailid, mille soojuslikud töötamistingimused on enam-vähem ühesugused, ühte gruppi. Temperatuuri mõõtmiseks on otstarbekas kasutada ümberlülitatavaid termopaare, mille põhimõtteline skeem on toodud joonisel 2. 4. 2.

Põhimõtteliselt oleks vaja kontrollida detailide elektrilisi ja soojuslikke režiime standardsetes, kõige halvemates ja kõige paremates välistes tingimustes, näiteks ümbritseva õhu standardse, tehnilise ülesandega ettenähtud kõige kõrgema ja kõige madalama temperatuuri juures, nominaalse, maksimaalse ja minimaalse (näit. 220 V, 242 V ja 198 V) võrgupinge juures jne. Mõõtmistulemused standardsetes kasutamistingimustes annaksid siis and-



Joon. 2. 4. 2. Termopaarid temperatuuri mõõtmiseks aparatuuris

meid tõrketuse arvutamiseks, aga mõõtmistega kõige äärmistes lubatud kasutamistingimustes me kontrolliksime, kas detailide koormused jäävad ka kõige halvemates tingimustes lubatud piiridesse. Kuid aja kokkuhoiu mõttes võib näiteks võrgupinge juures 242 V mõõta ainult nende detailide režiime, mille koormustegurid olid võrgupingel 220 V ähvardavalt lähedal 1,0-le, s. o. maksimaalselt lubatud koormusele.

c. Arvutame detailide koormustegurid. Praktiliselt on küllaldane arvutada nad ühekohalise täpsusega ja koormustegurid vahemikus (0, 0,05) lugeda võrdseks nulliga.

d. Järgnevalt on otstarbekohane fikseerida arvutuste tulemusi allpool toodud näidistabelis. Seejuures jagame kõik detailid gruppidesse tüüpide järgi ja iga grupi omakorda alagruppidesse koormusteguri ja temperatuuri järgi.

e. Leiame käsiraamatutest detailide tõrkeintensiivsuse

Alagrupi nr.	Detailitüüp	Koormustegur K_k	Temperat. °C	Detailide arv alagrupis n	Ekspluatatsioonitegur $a_1(T, K_n)$	Ekspluatatsioonitegur a_2	λ_0	$na_1a_2\lambda_0$

$$\Lambda = \sum na_1a_2\lambda$$

väärtused standardsel temperatuuril ja nimikoormusel (λ_0).

Täpsemate andmete puudumisel võib kasutada käesoleva raamatu lisas V toodud tabelit detaili tõrkeintensiivsuse keskmise, maksimaalse ja minimaalse väärtuse jaoks, valides sealt keskmise tulba. Kuid tuleb silmas pidada, et need andmed mitte ainult ei vanane, vaid iseloomustavad ka ühes või teises riigis saavutatud detailide tehnilist taset.

f. Teades koormusteguri väärtusi ja kasutades detailide temperatuuri mõõtmise protokolli, leiame käsiraamatutest ekspluatatsioonitegur $a_1(K_k, T)$. Elektronlampidele leiame veel teise, küttekoormusest sõltuva ekspluatatsioonitegur $a_2(K_{k2})$.

Ekspluatatsioonitegurite määramiseks võib kasutada lisas V toodud graafikuid. Kui arvutajal on kasutada täpsemaid andmeid ühe või teise konkreetse detailitüübi tõrkeintensiivsuse muutumise kohta temperatuuri ja elektrilise koormuse muutumisel, on muidugi otstarbekohasem kasutada neid andmeid.

g. Detaili tõrkeintensiivsus tegelikult esineva koormuse ja temperatuuri juures on

$\lambda_i = a_{1i}(K_k, T)\lambda_{io}$ (kõik detailid, välja arvatud elektronlambid),

$$\lambda_i = a_{1i}(K_k, T)a_2\lambda_{io} \text{ (elektronlambid).}$$

Neis valemeis i on alagrupi number, a_2 — elektronlampide täiendav ekspluatatsioonitegur küttekoormuse järgi.

Arvutame i-nda alagrupi summaarse tõrkeintensiivsuse Λ_i valemi

$$\Lambda_i = n_i \lambda_i$$

järgi, kus n_i on detailide arv i-ndas alagrupis.

h. Arvutame aparaadi tõrkeintensiivsuse Λ:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^{k} \Lambda_i,$$

kus k on alagruppide arv.

i. Aparatuuri keskmise tõrketu tööaja T_k leiame valemist

$$T_k = \frac{1}{\Lambda}.$$

j. Tõrketu töö tõenäosuse $P(t)$ mingi ajavahemiku t jooksul (näiteks 8 tunni jooksul või ettemääratud garantiiaja jooksul) leiame valemist

$$P(t) = e^{-\Lambda t}.$$

Eksponentfunktsiooni väärtuste leidmiseks võib kasutada lisas I toodud tabelit.

Kõiki arvutusi (välja arvatud tõrketu töö tõenäosuse väärtus väikeste ajavahemike jaoks) on küllaldane teostada kahekohalise täpsusega.

k. Mõnikord võib osutuda vajalikuks aparatuuri valmidusteguri K_v arvutamine. Selleks kasutame valemit (1. 5. 5), mis käesoleval juhul omab kuju

$$K_v = \frac{1}{1 + \sum_{j=1}^{k} \Lambda'_j t_{rj}}.$$

Siin t_{rj} tähistab j-nda detaililiigi tõrke kõrvaldamiseks vajalikku keskmist aega ja tema väärtuse võime määrata tabelist 2. 4. 2. k on erinevate detaililiikide arv aparatuuris Λ'_j, on j-nda detaililiigi tõrkeintensiivsus. Viimane saadakse sellesse liiki kuuluvate detailide tõrkeintensiivsuste liitmise teel.

K_v arvutamisel soovitame kasutada alljärgnevat tabeli vormi:

Grupi nr.	Detailide nimetus	Λ'_j	t_{rj}	$\Lambda'_j t_{rj}$

$$\sum \Lambda'_j t_{rj} = \ldots$$

Me eeldasime tõrketusparameetrite arvutamisel, et detailide tõrkeintensiivsused on (ajaliselt) konstantsed ehk teisiti, detailide tõrketu tööaeg on jaotunud eksponentsiaalselt ja sel juhul on ükskõik, kas vaatleme taastatavat või mittetaastatavat aparatuuri. Taastatava aparatuuri puhul langeb tõrkevoo parameeter kokku tõrkeintensiivsusega ja keskmine tõrgetevaheline tööaeg keskmise tõrketu tööajaga. Eeldus tööaja eksponentjaotusest tähendab praktiliselt detailide sissetöötamisperioodi mitte-arvestamist. Eespool vaatlesime reserveerimata süsteeme. Kirjeldatud moodus aparatuuri tõrketusparameetrite täpsustatud arvutamiseks detailide tõrketusparameetrite

Tabel 2.4.2

Ajakulu tõrke kõrvaldamiseks detaili asendamisega

Detaili nimetus	Ajakulu tundides	
	miinimum	maksimum
Elektronlambid	0,23	0,96
Takistid	0,30	1,28
Kondensaatorid	0,40	1,70
Induktiivpoolid	0,50	2,13
Trafod	0,67	2,85
Releed	0,70	2,98
Lülitid	0,25	1,06
Elektriajamid	1,25	5,31
Elektrimõõteriistad	0,40	1,70
Kvartsid	0,18	0,74
Signaallambid	0,03	0,13
Võnkeringid	0,65	2,76
Kaitsmed	0,03	0,11
Kontaktpesad	0,75	3,19
Muud detailid (lambipaneelid, pistikupesad, klemmid jms.)	0,58	2,44

järgi on ligikaudne, kuna detailide tõrkeintensiivsuse määramisel arvestame ainult kahte tõrketusele mõjuvat tegurit, temperatuuri ja elektrilist koormust. Puuduseks tuleb lugeda ka seda, et lähteandmed võivad olla ebatäpsed ning mõningate detailide jaoks isegi puududa. Siis tuleb kasutada mõne teiste analoogilise tüübi andmeid. Kuid andmeid detailide tõrkeintensiivsuse kohta avaldatakse järjest rohkem ja nad täpsustuvad pidevalt. Isegi suhteliselt ebatäpsete andmete juures on võimalik kahte aparatuuritüüpi võrrelda, kui me nende tõrketusparameetrite arvutamiseks kasutame detailide ühesuguseid tõrkeintensiivsuse väärtusi.

3.

Täpsus ja töökindlus

3. 1. Järskude ja aeglaste tõrgete tõenäosus

Nagu me eespool nägime, võib detailide tõrked jaotada tõrke tekkimise iseloomu järgi kahte liiki. Järsk tõrge tekib detaili mingi põhilise parameetri hüppelise muutumise tagajärjel. Aeglane tõrge, vastupidi, tekib parameetri järkjärgulise, pideva muutumise tagajärjel. Liigitus on teatud mõttes tinglik. Näiteks takisti läbipõlemine, s. t. juhtivuse muutumine nulliks, ilmselt kujutab endast pidevat protsessi, mis kestab mõned sekundid. Kuid võrreldes takisti läbipõlemist tema vananemisega, s. t. tema väärtuse muutumisega, mida võib täheldada alles pärast kuude ja aastate möödumist, loeme takisti läbipõlemise järsuks tõrkeks vaatamata sellele, et ka see protsess nõudis teatud aega. Valdava enamiku tõrgete liigitamisel aeglasteks ja järskudeks ei teki mingeid raskusi.

Järskude ja aeglaste tõrgete põhjused on enamikul juhtudel erinevad ja teineteisest sõltumatud. Järskude tõrgete põhjuseks on sisemiste pingete ja välise koormuse juhuslik suurenenud kontsentratsioon. Aeglased tõrked tekivad detaili üksikute osade materjali füüsikaliste ja keemiliste vananemis- ning kulumisprotsesside tagajärjel. Me võime defineerida tõrkeintensiivsuse eraldi (vt. valem 2. 3. 4) järskude tõrgete (olgu see $\lambda_j(t)$) ja aeglaste tõrgete ($\lambda_a(t)$) jaoks. Kui me loeme, et järsud ja aeglased tõrked tekivad teineteisest sõltumata, siis on detaili tõrkeintensiivsus $\lambda(t)$ nende kahe intensiivsuse summa. Niisiis

$$\lambda(t) = \lambda_j(t) + \lambda_a(t).$$

Tuletame meelde seose (1. 1. 11) tõrketu töö tõenäosuse $p(t)$ ja tõrkeintensiivsuse $\lambda(t)$ vahel. Saame, et

$$p(t) = \exp[-\int_0^t \lambda(t)\,dt] = \exp[-\int_0^t \lambda_j(t)\,dt - \int_0^t \lambda_a(t)\,dt] =$$

$$= \exp[-\int_0^t \lambda_j(t)\,dt]\exp[-\int_0^t \lambda_a(t)\,dt] = p_j(t)\,p_a(t), \tag{3. 1. 1}$$

kus

$$p_j(t) = \exp[-\int_0^t \lambda_j(t)\,dt] \tag{3. 1. 2}$$

on järskude tõrgete puudumise tõenäosus vahemikus $(0, t)$ ja

$$p_a(t) = \exp[-\int_0^t \lambda_a(t)\,dt] \tag{3. 1. 3}$$

on aeglaste tõrgete puudumise tõenäosus samas ajavahemikus.

Mitte alati ei ole vaja tõrkeid liigitada järskudeks ja aeglasteks. Elektrilised sõlmed, mille seisundit võib iseloomustada sõnadega «ja — ei», näiteks «kõrge väljundpinge — madal väljundpinge», «lamp on suletud — lampi läbib vool», on detailide õige valiku korral ebatundlikud detailide parameetrite muutumisele vananemise tagajärjel ning nende tõrked on peaasjalikult järsu iseloomuga. Loomulikult on siin üldises tõrkeintensiivsuses määrav järsk komponent. Tõrgete liigitamine järskudeks ja aeglasteks nõuab näiteks aparatuuri tõrketusparameetrite arvutamisel detailide järgi tõrgete erinevast iseloomust tingituna erinevate ning keerukamate matemaatiliste meetodite kasutamist. On arusaadav, et esimeses lähenduses pole tõrgete liigitamine vajalik ning arvutamisel võib kasutada eelmistes peatükkides tutvustatud meetodeid. Kahjuks on enamikus käsiraamatutes, mis sisaldavad konkreetsete detailide tõrkeintensiivsuse väärtusi, jäetud märkimata, kas tõrkeintensiivsuse väärtuste katselisel määramisel arvestati kõiki või ainult järske tõrkeid.

Nagu näeme allpool, on näiteks täpsete raadioelektronmõõteriistade täpsuse ja töökindluse vaatlemisel tõrgete liigitamine järskudeks ja aeglasteks mõõdapääsmatu.

Mitmes kohas eespool võtsime detailide tõrkeintensiivsust konstantsena, järelikult on tõrketu tööaeg jaotunud

eksponentsiaalselt. Tingimust $\lambda = \text{const}$ võib vaadelda kui esimest lähendust ning sedagi mitte alati, kuna paljude ja eriti just täpsete detailide tõrkeintensiivsusel on kvalitatiivselt erinev sõltuvus ajast. Kui mingi detaili jaoks on leitud tõrkeintensiivsus nii kõikide kui ka ainult järskude tõrgete kohta, siis harilikult on järskude tõrgete intensiivsus konstantseks loetav täpsemini kui kõikide tõrgete intensiivsus. Nii teoreetilistest uurimustest kui ka praktilistest kogemustest tuleneb ka see, et aeglaste tõrgete intensiivsust on sageli võimatu aproksimeerida sirgega $\lambda_a = \text{const}$.

Lähtudes eeldusest, et järskude tõrgete intensiivsus $\lambda_j = \text{const}$, võime avaldise (3. 1. 1) kirjutada kujul

$$p(t) = \exp[-\lambda_j t] \exp\left[-\int_0^t \lambda_j(t)\,dt\right]. \qquad (3.1.4)$$

Kui on tegemist mittetaastatava aparatuuriga, mis sisaldab n detaili, kusjuures erinevate detailide tõrked tekivad üksteisest sõltumata ja iga detaili tõrge kutsub esile aparatuuri tõrke, siis vastavalt valemile (1. 3. 1) aparatuuri tõrketu töö tõenäosus

$$P(t) = \prod_{i=1}^{n} p_i(t) = \prod_{i=1}^{n} p_{ij}(t)\, p_{ia}(t) = \prod_{i=1}^{n} p_{ij}(t) \prod_{i=1}^{n} p_{ij}(t) =$$

$$= \exp\left[-\left(\sum_{i=1}^{n} \lambda_{ij}\right) t\right] \prod_{i=1}^{n} p_{ia}(t). \qquad (3.1.5)$$

Indeks i on detaili järjekorranumber; $p_{ij}(t)$ ja $p_{ia}(t)$ on vastavalt i-ndal detailil järsu ja aeglase tõrke puudumise tõenäosus ajavahemikus $(0, t)$.

Tähistame

$$\prod_{i=1}^{n} p_{ia}(t) = S(t). \qquad (3.1.6)$$

Eeldame, et detailide aeglane tõrge kutsub esile ka aparatuuri aeglase tõrke, nagu see näiteks täpsetes raadioelektronmõõteriistades ka on. $S(t)$ on niisiis aeglase tõrke puudumise tõenäosus aparatuuris. Valemitest (3. 1. 3) ja (3. 1. 6) näeme, et juhul kui aeglaste tõrgete intensiivsused $\lambda_{ia}(t)$ ei ole konstantsed, saame $S(t)$ jaoks küllaltki keerulise avaldise.

Isekõrvalduvaid detailide tõrkeid me siinkohal ei vaatle.

Avaldise (3. 1. 5) võime kirjutada kujul

$$P(t) = R(t)S(t), \qquad (3.1.7)$$

kui tähistada aparatuuri järskude tõrgete puudumise tõenäosust tähisega $R(t)$, kusjuures

$$R(t) = \exp\left[-\left(\sum_{i=1}^{n}\lambda_{ij}\right)t\right] \qquad (3.1.8)$$

ning on detailide tõrkeintensiivsuste kaudu kergesti leitav. Kuid $S(t)$ keeruline sõltuvus detailide aeglaste tõrgete intensiivsustest sunnib meid otsima teisi teid aparatuuri aeglase tõrke puudumise tõenäosuse määramiseks.

Ka siis, kui on tegemist taastatava aparatuuriga, võib osutuda vajalikuks järskude ja aeglaste tõrgete eraldi käsitlemine. Kui eeldame, et järskude tõrgete intensiivsus on konstantne, siis on $R(t)$ arvutamiseks detailide järskude tõrgete intensiivsuse järgi rakendatavad paragrahv 1.4 mõisted ja matemaatilised seosed. Kuid aparatuuri aeglaste tõrgete voo parameetri määramine osutub ilmselt tunduvalt keerukamaks ülesandeks.

3.2. Mõõteriistade täpsus ja aeglased tõrked

Käesolevas ja mõnes järgmises paragrahvis vaatleme täpsuse ja töökindluse (või täpsemalt mõõtevea ja aeglaste tõrgete) probleemi konkretiseeritult raadioelektronmõõteriistade kohta. Käsitletavad probleemid on kergesti üldistatavad nii igasuguste füüsikaliste mõõteriistade kui ka elektroonikaaparatuuri jaoks.

Täpsuse ja töökindluse vahelised seosed on aga suhteliselt vähe uuritud ala. Mõõtetäpsust tuleb vaadelda sõltuvalt ajast. Mõõtetäpsuse ajalise muutumise käigus saabub moment, kui mõõtetäpsus ei vasta mõõteriista suhtes ülesseatud tingimustele. Kasutades töökindlustermineid ütleme, et tekkis mõõteriista tõrge. Mõõteriista täpsuse muutumine on tingitud tema detaile iseloomustavate parameetrite muutumisest mitmesuguste füüsikaliste ja keemiliste protsesside tagajärjel, aga samuti väliste klimaatiliste ja mehaaniliste tegurite mõjust.

Selgitame lühidalt, mida me mõistame raadiodetaili parameetri täpsuse (või lühemalt — detaili täpsuse) all. Eeldame, et detaili iseloomustab ainult üks parameeter. Kui detaili iseloomustab rohkem kui üks parameeter, näiteks võimenduslambi tõus ja sisetakistus, ei tekita üldistamine põhimõttelisi raskusi. Detaili (näiteks kondensaatori) parameetri (näiteks mahtuvuse) täpsuseks nimetame parameetri tegeliku väärtuse lähedusastet parameetri nimiväärtusele. Detaili veaks nimetame parameetri tegeliku väärtuse erinevust nimiväärtusest.

Vaatleme, millest on tingitud detaili parameetri tegeliku väärtuse erinemine nimiväärtusest.

Tehnoloogiliselt pole võimalik toota detaile (näiteks võimenduslampe) absoluutselt ühesuguste parameetri (näiteks tõusu) väärtustega; ühte tüüpi võimenduslampide tõusud on rohkem või vähem hajunud tõusu mingisuguse keskväärtuse ümber. Peaaegu kõiki raadiodetaile on võimalik toota tunduvalt täpsemalt, s. o. tegeliku väärtuse väiksema kõrvalekaldumisega nimiväärtusest. Kuid ühest küljest on täpsemate detailide valmistamiseks reeglina vajalik parem materjal ning keerulisem tehnoloogiline protsess, mis suurendab detaili omahinda; teisest küljest pole detailide suur täpsus alati tehniliselt põhjendatud ning vajalik. Sellepärast on detailide täpsus määratud mitte ainult tehniliste, vaid ka majanduslike teguritega.

Seda osa detaili veast, mis on tingitud tehnoloogilise protsessi iseärasustest, nimetame detaili tehnoloogiliseks veaks. Mõõtes parameetri väärtust vahetult enne detaili pakkimist lattusaatmiseks standardsetel tingimustel (ümbritseva õhu temperatuur $20 \pm 1°$ C, suhteline õhuniiskus $65 \pm 2\%$) ning lahutades sellest nimiväärtuse, leiaksime absoluutse tehnoloogilise vea, kust on võimalik üle minna suhtelisele veale (protsentides nimiväärtusest). Detaili tehnoloogiline viga on juhuslik muutuja. Nagu on võimatu valmistada detaili, mille parameetri väärtus vastaks absoluutselt täpselt nimiväärtusele, on võimatu valmistada ka kaht detaili, mille parameetrite väärtused langeksid kokku. Praktiliselt on ühte tüüpi ja ühesuguse nimiväärtusega detailide parameetrite väärtused grupeerunud nimiväärtuse ümber või nimiväärtuse läheduses. Mõõtes teatud hulga detailide parameetrite tegelikud väärtused, võime detailid parameetrite vea järgi jaotada

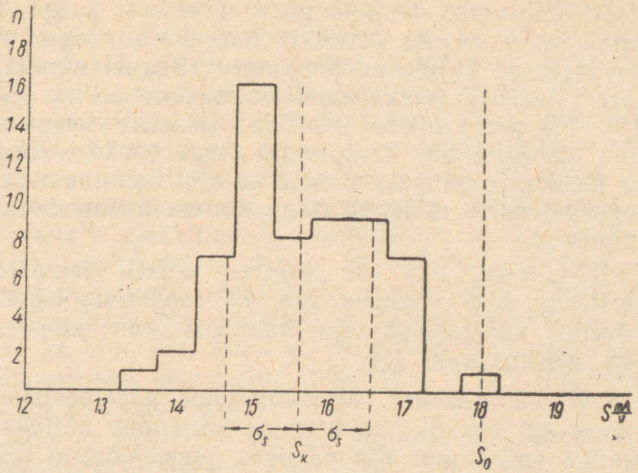
gruppidesse, näiteks detailid veaga — 1,0...—0,9%, —0,9...—0,8%, —0,8...—0,7% jne., ja ehitada nn. histogrammi, kus ordinaatteljel on vastava väärtusega detailide arv n grupis.

Joonisel 3.2.1 on toodud näitena histogramm 6Ж9П tüüpi 60 lambi tõusu jaotuse kohta teatud režiimis. Histogramm joonisel 3.2.2 on saja viisteist 0,5%-liste traattakistite vea jaotuse kohta. Neil joonistel on märgitud nimiväärtus indeksiga 0, keskväärtus indeksiga k ja ruutkeskmine hälve σ.

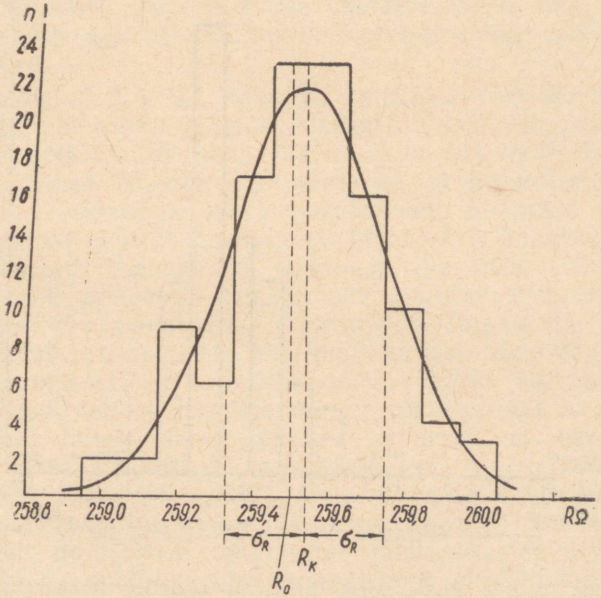
Matemaatiliselt saame detaili parameetri vea jaotuse mingi jaotusseadusega, näiteks vea tõenäosustihedusega $p(x)$. Korrutis $p(x)dx$ tähendaks siis tõenäosust, et viga asub vahemikus $(x, x+dx)$. Kui pole teada jaotusseadus, võib vea iseloomustamiseks kasutada vea matemaatilist ootust (matemaatilist ootust võib ette kujutada kui aritmeetilise keskmise üldistust), vea ruutkeskmist hälvet, dispersiooni (dispersioon on ruutkeskmise hälbe ruut) jne.

Kuid tehnoloogilise protsessi iseärasused ei ole ainuke põhjus, mis kutsub esile detaili vea. Nagu nägime, määratakse tehnoloogiline viga kohe pärast detaili valmistamist standardsetel välistingimustel. Kui aga detaili temperatuur aparatuuris erineb temperatuurist $20 \pm 1°$ C, ümbritseva õhu suhtelisest niiskusest $65 \pm 2\%$ jne., võivad need tegurid põhjustada detaili parameetri väärtuse muutumise, võrreldes standardsetel tingimustel mõõdetud väärtustega. Detaili väärtuse muutumist temperatuuri muutumisel iseloomustatakse takistuse, mahtuvuse jne. temperatuuriteguriga üldiselt tuntud valemite abil. Kuigi suhtelise õhuniiskuse mõju parameetritele on suur, ei ole võimalik (seoses nii-öelda niiskusliku inertsiga) õhuniiskuse mõju arvestamiseks kasutada takistuse, mahtuvuse jne. temperatuuriteguriga analoogilisi «niiskustegureid».

Ka temperatuuritegurit peame käsitlema statistiliselt. Tungimata üksikasjadesse võime väita, et detaili temperatuuriteguri väärtus määratakse materjali ühtluse ja tehnoloogilise protsessi stabiilsusega. Kuid suuremad või väiksemad kõikumised materjali koostises on paratamatud, nagu on paratamatud teatud kõrvalekaldumised tehnoloogilise protsessi ettenähtud käigus. Ka detaili valmistamise automaatliinid ei suuda kindlustada abso-



Joon. 3. 2. 1. Elektronlambi 6Ж9П tõusu jaotus

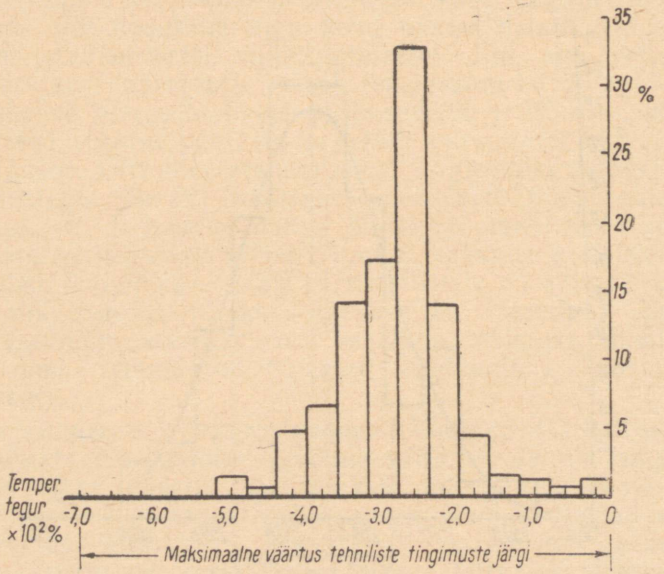


Joon. 3. 2. 2. Traattakistite takistuse jaotusgraafik

luutselt ühesugust tehnoloogilise protsessi kulgu. Resultaadina on erinevate detailide temperatuuriteguri tegelikud väärtused hajutatud temperatuuriteguri nimiväärtuse ümber. Parema ettekujutuse saamiseks toome joonisel 3. 2. 3 [17] poolevatiste BC-tüüpi takistite temperatuuriteguri histogrammi. Temperatuuriteguri väärtuste jaotumise iseloomustamiseks peame ka siin kasutama selliseid tõenäosusteooria mõisteid nagu matemaatiline ootus, dispersioon jne.

Detaili viga, mis on tingitud detaili temperatuuri, ümbritseva õhu niiskuse jne. kõrvalekaldumisest standardsetest väärtustest, nimetame vastavalt temperatuuriveaks, niiskusveaks jne.

Detaili vananemine väljendub tema parameetrite muutumises aja jooksul. Vananemine väljendub näiteks elektronlambi emissiooni vähenemises, masstakistite takistuse suurenemises, elektrolüütkondensaatorite mahtuvuse vähe-



Joon. 3. 2. 3. Poolevatiste BC-tüüpi takistite temperatuuritegur

nemises jne. Vananemise põhjuseks on mitmesugused pöördumatud füüsikalis-keemilised protsessid detailides.

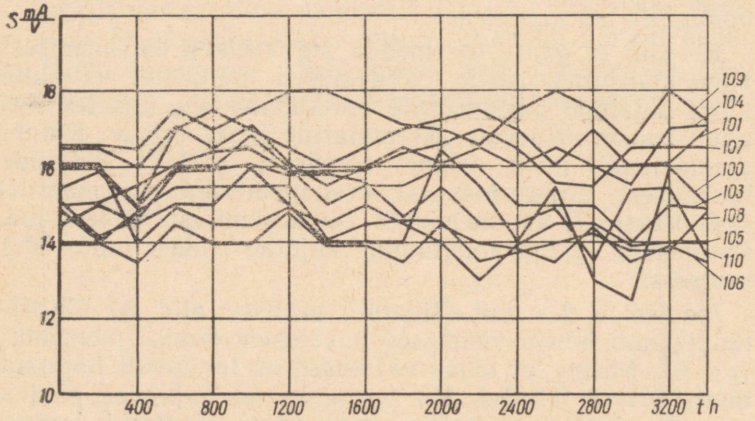
Detaili kasutamisel aparatuuris mõjutavad tema parameetrite muutumist rakendatud pinge, detaili läbiv vool, tema temperatuur, aga samuti mehaaniline vibratsioon, mehaanilised löögid jne., kusjuures reeglina need tegurid suurendavad (piltlikult väljendudes) parameetrite muutumise kiirust. Seda osa parameetrite muutumises, mis sõltub detaili elektrilisest, soojuslikust ja mehaanilisest režiimist, nimetatakse sageli kulumiseks; erijuhul, kui on tegemist ainult elektriliste suurustega, nimetatakse seda elektriliseks kulumiseks. Praktikas muutuvad parameetrid ka siis, kui detail ei ole elektriliselt, soojuslikult ja mehaaniliselt koormatud, näiteks detailide pikaajalisel hoidmisel laotingimustes.

Ka siin ei pääse me mööda statistilisest lähenemisest vananemisprotsessidele. Kogemused näitavad, et ühte tüüpi detailide parameetrite muutumine ühesugustes tingimustes on erinevate eksemplaride jaoks erinev. Kindla ajamomendi jaoks võime seepärast rääkida detailide keskmisest vananemisveast (vananemisvea matemaatilisest ootusest), vananemisvea ruutkeskmisest hälbest jne. Parameetri ajaline muutumine kujutab endast juhuslikku protsessi.

Joonisel 3. 2. 1 oli näidatud, millised olid 60 6Ж9П-tüüpi lambi tõusu väärtused kasutuselevõtmise momendil ($t = 0$). Näeme, et tõusu väärtused on tunduvalt hajunud nimiväärtuse lähedal. Me teame ka, et hajumise põhjus seisneb võimatuses toota absoluutselt identseid lampe. Kui lambid oleksid absoluutselt identsed ja kasutamisolud absoluutselt ühesugused, toimuksid ka need füüsikalis-keemilised protsessid lambis, mis avalduvad tõusu muutumises (vananemises), absoluutselt ühtemoodi. Vastasel korral (nii nagu see tegelikult ka on) toimuvad vananemisprotsessid erineva kiirusega erinevas suunas, lühidalt, konkreetsete lampide vananemiskõveratel on erinev iseloom. Tuleb silmas pidada ka seda, et nende 60 lambi kasutamisolud aparatuuris ei ole absoluutselt identsed. Paratamatult kõiguvad teatud piirides elektroodidele rakendatud pinge ja lambi ballooni temperatuur tingitult muutustest lokaalsetes jahutusoludes jne. See asjaolu suurendab veelgi juhuslikkuse osatähtsust lambi tõusu muutumisel aja jooksul. Mõõtes perioodiliselt lambi

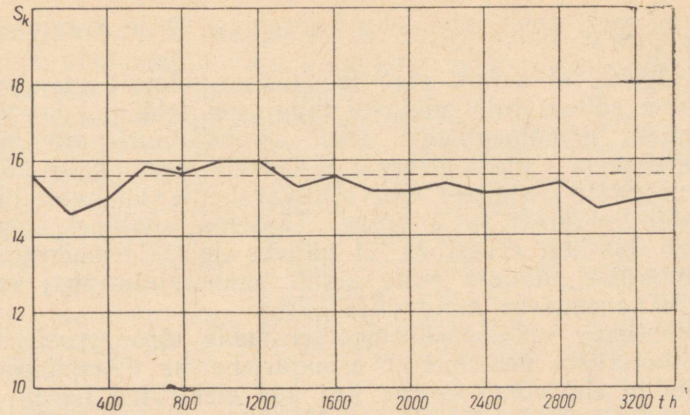
parameetrite (tõusu) väärtusi, ei suuda me garanteerida lambi absoluutselt ühesugust režiimi, mis omakorda suurendab tõusu väärtuste hajumist. Viimane asjaolu ei olene lambi omadustest, vaid kasutatavast mõõtmismetoodikast ja mõõteaparatuurist.

Joonisel 3. 2. 4 on kujutatud 10 (pidevalt töötava) 6Ж9П-tüüpi lambi tõusu mõõtmise tulemused 200 tunni tagant (üldse mõõdeti 60 lambi parameetreid). Jälgides mõnda neist kümnest kõverast, võime veenduda nende kõige mitmesugusemas iseloomus. Me räägime, et tõusu muutumine kujutab endast juhuslikku protsessi; konkreetse lambi tõusu muutmine on selle juhusliku protsessi üheks realisatsiooniks.

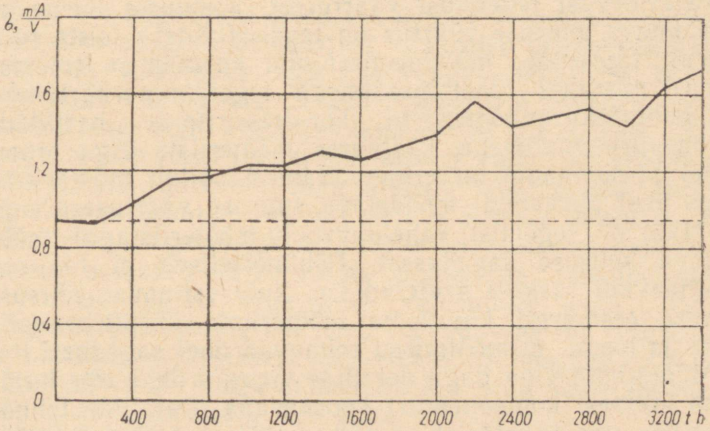


Joon. 3. 2. 4. Kümne 6Ж9П-tüüpi lambi tõusu muutumine aja jooksul

Võime täheldada teatud seaduspärasusi vaadeldavas kümnes realisatsioonis joonisel 3. 2. 4. Jooniselt nähtub, et aja möödudes kõverad eemalduvad üksteisest ja neil puudub tendents tõusu tunduvaks suurenemiseks või vähenemiseks. Ilmselt toimime õigesti, kui leiame ajamomentide 0, 200, 400, 600 jne. jaoks tõusu keskmise väärtuse ja ruutkeskmise hälbe ning püüame nende suuruste muutumisest aja jooksul teha täpsemaid järeldusi lambi vananemise kohta. Joonistel 3. 2. 5 ja 3. 2. 6 on toodud 60 lambi mõõtmise põhjal arvutatud keskmise S_k ja ruutkeskmise hälbe σ_s väärtused. Tõepoolest, nad vaid kinni-



Joon. 3. 2. 5. Lambi 6Ж9П tõusu keskväärtuse muutumine aja jooksul



Joon. 3. 2. 6. Lambi 6Ж9П tõusu ruutkeskmise hälbe muutumine aja jooksul

tavad meie poolt juba tehtud järeldusi tõusu muutumise kohta.

Nägime, et detaili viga moodustub kolmest enam või vähem sõltumatute põhjuste tagajärjel tekkinud komponendist: tehnoloogilisest veast, temperatuuri- või niiskusveast ja vananemisveast. Edaspidi loeme need kolm komponenti üksteisest mittesõltuvaks, mis tunduvalt lihtsustab analüüsi ja arvutusi. Täpsema analüüsi korral tuleb muidugi arvestada, et näiteks detaili temperatuuri muutumisel muutub mitte ainult temperatuuriviga, vaid ka vananemisvea muutumise kiirus.

Vaatleme raadioelektronmõõteriistade täpsusprobleemi.

Mõõteriista vea määrab esmajärjekorras töötamispõhimõte ja elektriline skeem. Kui aga elektriline skeem on kindlaks määratud, sõltub mõõteriista täpsus kasutatavate detailide täpsusest.

Mõõteriista täpsuse all mõistame suuruse mõõdetud väärtuse lähedusastet mõõdetava suuruse tegelikule väärtusele. Mõõteriista veaks nimetame siis mõõdetud väärtuse erinevust tegelikust väärtusest. Seejuures loeme, et mõõdetava suuruse väärtus on teada (näiteks teiste tunduvalt täpsemate mõõtmismeetodite kasutamise tulemusena) mistahes lähendusastmega tegelikule väärtusele.

Raadioelektronmõõteriistu konstrueeritakse harilikult mitmepiirkonnalistena, kusjuures mõõteriista viga erinevatel piirkondadel on erinev. Samuti sõltub mõõteriista viga ühel piirkonnal mõõdetava suuruse väärtusest, aga ka (kui on tegemist vahelduvvoolu-mõõteriistaga) mõõdetava suuruse sagedusest. Põhimõtteliselt ei too see täiendavaid raskusi aruteludesse, kuid esitamise lihtsustamise eesmärgil kujutleme mõõteriista ühepiirkonnalisena ja loeme, et mõõtmised toimuvad ühel sagedusel.

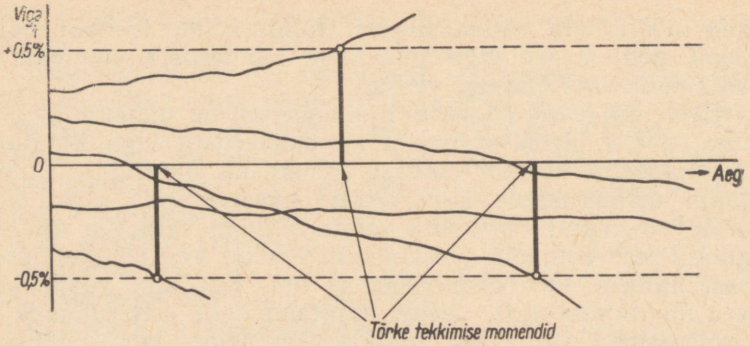
Mõõteriista viga nagu detailide vigagi võime ette kujutada kolmest komponendist koosnevana. Detailide tehnoloogilise vea tagajärjel ei näita mõõteriist täpselt mõõdetava suuruse väärtust, vaid väärtust, mis erineb tegelikust mõõteriista tehnoloogilise vea võrra. Kui mõõteriista välised töötingimused erinevad standardsetest, erineb ka mõõteriista viga tema veast standardsetel tingimustel. Sellist viga on loomulik nimetada välistele tingimustele vastavalt temperatuuriveaks, niiskusveaks jne. Detailide vananemise tagajärjel muutub mõõteriista viga standardsetel tingimustel aja jooksul. See põhjustaks

siis mõõteriista vananemisvea. Kõigi kolme komponendi poolt põhjustatud viga nimetame mõõteriista summaarseks veaks või lihtsalt veaks.

Et detailide viga kindlal ajamomendil on juhuslik muutuja, peaks olema selge, et ka mõõteriista viga kindlal ajamomendil kujutab endast juhuslikku muutujat. Ühte tüüpi mõõteriistade konkreetsete eksemplaride vead on erinevad ning tüübi kohta võime rääkida vaid vea matemaatilisest ootusest (keskmisest veast), vea ruutkeskmisest hälbest, vea dispersioonist jne. Kui aga vaadelda vea muutumist ajas, peame kujutama teda ette juhusliku protsessina, nagu me näiteks käsitleme lambi tõusu muutumist.

Seeriaviisiliselt toodetavate mõõteriistade juures on kujunenud reegliks nende täpsuse iseloomustamine nn. lubatud vea abil. Näiteks lubatud viga protsentides mõõdetavast suurusest (kindlates kasutamisoludes, kindlal sagedusel jne.) väljendatakse kujul 10^nA, kus A on üks eelisarvudest 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6 ja 7 ning n positiivne või negatiivne täisarv või null. Räägitakse näiteks 1,5%-lise veaga mõõteriistast, 0,5%-lise veaga mõõteriistast jne. Kasutades 0,5%-lise veaga mõõteriista laboratooriumis või tsehhis, eeldab insener või tehnik, et selle mõõteriista viga absoluutväärtuselt ei ületa 0,5%, kuigi nagu see on hästi teada, aja jooksul viga võib (absoluutväärtuselt) suureneda ning ületada lubatud vea. Juhime tähelepanu lubatud vea mõiste ühele uuele nüansile. Kui tehnilistes tingimustes on mõõteriista lubatud vea väärtuseks näidatud 0,5%, loeme mõõteriista töövõimeliseks, kui tema tegelik viga asub vahemikus —0,5 ... 0,5%, ning töökõlbmatuks, kui tema tegelik viga on (algebraliselt väärtuselt) väiksem kui —0,5% või suurem kui 0,5%. Järelikult tekib tõrge momendil, kui viga saab absoluutväärtuselt suuremaks kui 0,5%.

Mõõteriista tüübi viga peame käsitlema kui juhuslikku protsessi. Mõõteriista konkreetse eksemplari vea muutumine aja jooksul annaks siis meile selle juhusliku protsessi ühe realisatsiooni. Joonisel 3. 2. 7 on kujutatud mõõteriista viie eksemplari vea muutumine aja jooksul, s. t. mõõteriista (kui tüübi) vea muutumise juhusliku protsessi viis realisatsiooni. Sealsamas on kujutatud lubatud viga (0,5%) ja tõrgete tekkimise momendid. Loomulikult on siin tegemist aeglaste tõrgetega.



Joon. 3. 2. 7. Mõõteriista tõrke tekkimine

Nüüd me võime formuleerida kaks probleemi, mis kerkivad inseneri ette arendustööde käigus:

a) kuidas määrata mõõteriista vea muutumist aja jooksul, kui on teada tema detailide vananemist iseloomustavad andmed ja

b) kuidas määrata mõõteriista aeglaste tõrgete puudumise tõenäosust, kui on teada mõõteriista vananemist iseloomustavad suurused.

Nende kahe probleemi vaatlemisele asume järgmises paragrahvis.

3. 3. Mõjutegurite meetod ja juhuslike funktsioonide lineariseerimine

Tähistame elektronmõõteriista näidu tähega ζ. Näit on mõõdetava suuruse y funktsioon. Kuid näit ei sõltu mitte ainult mõõdetavast suurusest, vaid ka mõõteriista detailide parameetritest $\xi_i (i = 1, 2 \ldots n)$. Võime kirjutada, et

$$\zeta = f(y; \xi_1, \xi_2 \ldots \xi_n). \qquad (3.3.1)$$

Asendades näiteks elektronvoltmeetri sisendpingejaguris mõne takistitest teistsuguse nimiväärtusega takistiga, muutub ka näit (muutub mõõteriista viga). Samal ajal esineb mõõteriistas detaile (näiteks alaldites, alaldi filtrites, lahtisidestusahelates, varivõre ahelates ja muudes kohtades olenevalt mõõteriista skeemist), mille parameetri väärtuse muutumine 20% võrra ei mõjuta märgatavalt

mõõteriista näitu. Olgu n nende detailide arv, mille väärtuse muutumine mõjutab näitu.

Loomulikult saame «õige» väärtusega detaili asendamisel «vale» väärtusega detailiga ka «vale» näidu. Kuid asendades ühe vaadeldavast n detailist sama nimiväärtusega teise detailiga, muutub ka mõõteriista näit, kuna nägime, et kahe ühesuguse nimiväärtusega detaili tegelik väärtus on tehnoloogilistest põhjustest tingituna (aga ka vananemisprotsessidest) erinev. Detaili parameetri väärtus on juhuslik. Juhuslike muutujate tähistamiseks kasutame siin ja edaspidi kreeka tähti. Juhuslike muutujate väärtuste jaoks tarvitame vastavaid ladina tähti.

Detailide parameetrite väärtused muutuvad suhteliselt väikeses vahemikus

$$x_{i0} - \frac{K}{100} x_{i0}, \qquad x_{i0} + \frac{K}{100} x_{i0},$$

kus x_{i0} on parameetri nimiväärtus, K — tehnilistes tingimustes toodud maksimaalne detaili viga protsentides. Nende detailide jaoks, mis mõjutavad tunduvalt mõõteriista näitu, on K harva suurem paarist protsendist. Sellepärast võime avaldise (3. 3. 1) arendada Taylori ritta detailide nimiväärtuste ligiduses ja piirduda esimese väiksusjärgu liikmetega.

Saame:

$$\zeta = z_0 + \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial f}{\partial \xi_i}\bigg|_{\xi_i = x_{i0}} (\xi_i - x_{i0}),$$

kus

$$z_0 = f(y;\ x_{10},\ x_{20},\ \ldots,\ x_{n0})$$

kujutab endast näitu juhul, kui kõikide detailide väärtused võrduksid täpselt nimiväärtustega. Tuletiste väärtus leitakse tingimusel, et parameetrite tegelik väärtus võrdub nimiväärtusega. Kuna detailide vajalikud nimiväärtused arvutatakse eeldusest, et mõõteriista viga võrduks nulliga, kui kõikide detailide tegelikud väärtused vastaksid täpselt nimiväärtusele, ei ole z_0 mitte midagi muud kui nn. «õige» näit. Viies z_0 vasakule poole ning mõlemaid pooli z_0-ga jagades saame:

$$\frac{\zeta - z_0}{z_0} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial f}{\partial \xi_i}\bigg|_{\xi_i = x_{i0}} \frac{\xi_i - x_{i0}}{z_0}$$

Vasakul pool on «näidu suhteline viga» (me kasutame terminit «näidu viga» samas mõttes kui «mõõteriista viga»). Kuna raadioelektronmõõteriistade viga nagu detailide vigagi väljendatakse protsentides, korrutame vasakut ja paremat poolt 100-ga ja siis korrutame ja jagame iga liiget paremal pool x_{i0}-ga.

$$\frac{\zeta - z_0}{z_0} \cdot 100 = \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial f}{\partial \xi_i}\Bigg|_{\xi_i = x_{i0}} \frac{x_{i0}}{z_0} \frac{\xi_i - x_{i0}}{x_{i0}} \cdot 100 \quad (3.3.2)$$

või

$$\varrho = \sum_{i=1}^{n} B(\zeta; \xi_i)\eta_i, \quad (3.3.3)$$

kus

$$\varrho = \frac{\zeta - z_0}{z_0} 100 \quad (3.3.4)$$

on näidu (mõõteriista) viga protsentides,

$$\eta_i = \frac{\xi_i - x_{i0}}{x_{i0}} 100 \quad (3.3.5)$$

on i-nda detaili viga protsentides ja

$$B(\zeta; \xi_i) = \frac{\partial f}{\partial \xi_i}\Bigg|_{\xi_i = x_{i0}} \frac{x_{i0}}{z_0} \quad (3.3.6)$$

on nn. mõjutegur. Pole raske mõista, kust pärineb see nimetus. $B(\zeta; \xi_i)$ väljendab i-nda detaili vea osatähtsust näidu vea moodustamisel.

Avaldis (3.3.2) ei sisalda mõõdetavat suurust y. Kuid näidu viga ϱ sõltub mõõdetavast suurusest kaudselt osatuletiste ja z_0 kaudu. Nii detailide vead η_i kui ka näidu viga ϱ on aja t juhuslikud funktsioonid ning täpsem oleks olnud kirjutada muidugi η_i ja ϱ asemel $\eta_i(t)$ ja $\varrho(t)$.

Nagu nägime eelmises paragrahvis, mõjutavad detaili parameetri väärtust kõige mitmesugusemad tegurid, esmajärjekorras tehnoloogilised iseärasused, temperatuur ja vananemisprotsessid. Sellepärast võib detaili vea sõltuvusel ajast olla kõige mitmesugusem iseloom.

Kirjutame i-nda detaili parameetri lihtsamal kujul

$$\xi_i = x_{i0}\left(1 + \frac{\alpha_i}{100}\right)\left[1 + \frac{\beta_i}{100}(T - T_0)\right]\left(1 + \frac{\gamma_i}{100}t\right), \quad (3.3.7)$$

kus β_i on parameetri temperatuuritegur protsentides,

γ_i — vananemistegur protsentides, sisuliselt kujutab ta endast parameetri muutust (protsentides) ajaühiku jooksul,

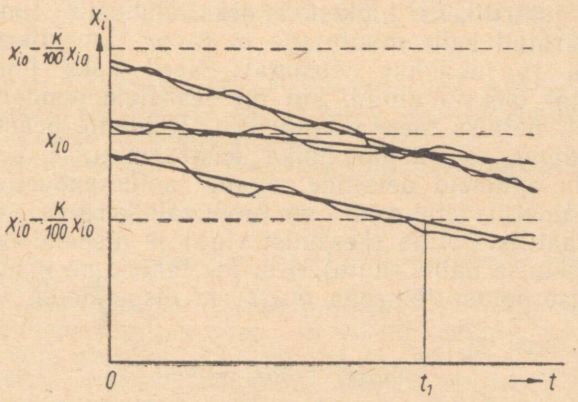
a_i — analoogia põhjal nimetame «tehnoloogilise hajumise teguriks» protsentides, sisuliselt on ta protsentuaalne kõrvalekaldumine nimiväärtusest tehnoloogilistel põhjustel,

T — detaili temperatuur,

T_0 — standardne temperatuur,

t — aeg detaili valmistamise momendist alates (detaili vanus).

Nagu nägime, seisneb lihtsustus kõigi reaalsete sõltuvuste asendamises lineaarsete sõltuvustega. Temperatuurisõltuvuse puhul kõneleb asenduste kasuks küllaldane empiiriline materjal ja asjaolu, et detailide temperatuuri muutumise vahemik on suhteliselt väike (saja kraadi piirides). Katseliselt on nõrgemini põhjendatud vananemisprotsesside aproksimeerimine lineaarse sõltuvusega. Kuid mitte väga pikkade ajavahemike jaoks on ta kahtlematult vastuvõetav. Meelde tuletades eelmise paragrahvi materjali, loeme, et a_i, β_i ja ν_i on juhuslikud muutujad. Valemi (3. 3. 7) kasutamisega tehtud lihtsustusi illustreerib joonis 3. 3. 1. Sellel joonisel on kujutatud kolme ühesuguse detaili parameetri tegelik muutumine aja jooksul



Joon. 3. 3. 1. Vananemisprotsesside lineariseerimine

(juhusliku vananemisprotsessi kolm realisatsiooni) ning nende aproksimeerimine juhuslike lineaarsete protsessidega, s. t. juhusliku algordinaadi ja juhusliku tõusuga kiirtega.

Eeldame, et

$$\left|\frac{\alpha_i}{100}\right| \ll 1;$$

$$\left|\frac{\beta_i}{100}\right| (T - T_0) \ll 1;$$

$$\left|\frac{\gamma_i}{100} t\right| \ll 1.$$

Toodud eeldustel

$$\eta_i(t) = \alpha_i + \beta_i(T - T_0) + \gamma_i t. \qquad (3.3.8)$$

Võime tähistada

$$\alpha_i + \beta_i(T - T_0) = \delta_i. \qquad (3.3.9)$$

Siis

$$\eta_i(t) = \delta_i + \gamma_i t. \qquad (3.3.10)$$

Teame, et α_i, β_i ja γ_i on juhuslikud muutujad, siis ka δ_i kui kahe juhusliku muutuja summa on juhuslik muutuja. Valemist (3.3.10) on hästi näha, et kindlate δ_i ja γ_i väärtuste korral on $\eta_i(t)$ aja lineaarne funktsioon. Kuna δ_i ja γ_i on juhuslikud muutujad, erinevad juhusliku lineaarse protsessi (3.3.10) realisatsioonid üksteisest algordinaadi ja tõusu poolest. (Eeldame, et $t \geqslant 0$.)

Me nimetame sarnaseid juhuslikke funktsioone lineaarseteks juhuslikeks funktsioonideks. Juhuslik funktsioon on määratud kahe muutujaga α_i ja γ_i (juhusliku algordinaadi ja juhusliku tõusuga). Need kaks juhuslikku muutujat oleksid antud, kui me teaksime nende jaotusseadust, näiteks tõenäosustihedust. Kuid me peame meeles pidama, et raadiotehnika käsiraamatutes harilikult ei leidu andmeid detailide vigade jaotusseaduste kohta. Käsiraamatute andmetest on tunduvalt kergem leida vea matemaatilist ootust (keskmist viga) ja dispersiooni (vea ruutkeskmise hälbe ruutu). Kui me tähistame $\eta_i(t)$ matemaatilise ootuse tähisega $m_{\eta i}(t)$ ja dispersiooni tähisega $\sigma^2_{\eta\, i}(t)$, siis

$$m_{\eta i}(t) = m_{\delta i} + m_{\gamma i} t \qquad (3.3.11)$$

ja

$$\sigma^2_{\eta i}(t) = \sigma^2_{\delta i} + \sigma^2_{\gamma i} t^2, \qquad (3.3.12)$$

$m_{\delta i}$, $m_{\gamma i}$, $\sigma^2_{\delta i}$ ja $\sigma^2_{\gamma i}$ on siis vastavalt suuruste δ_i ja γ_i matemaatilised ootused ja dispersioonid. Kui arvestada valemit (3. 3. 9), võime viimased kolm valemit kirjutada praktiliselt enam kasutataval ja ülevaatlikumal kujul:

$$m_{\eta i}(t) = m_{\alpha i} + m_{\beta i}(T - T_0) + m_{\gamma i}t, \quad (3.3.13)$$

$$\sigma^2_{\eta i}(t) = \sigma^2_{\alpha i} + \sigma^2_{\beta i}(T - T_0)^2 + \sigma^2_{\gamma i}t^2. \quad (3.3.14)$$

Valemist (3. 3. 13) näeme, et detaili keskmine viga moodustub kolmest liidetavast, kusjuures kaks esimest liidetavat ei sõltu ajast, kolmas aga sõltub ajast lineaarselt. Esimeseks liidetavaks on keskmine tehnoloogiline viga, teiseks liidetavaks keskmise temperatuuriteguri korrutis detaili faktilise temperatuuri ja standardse temperatuuri vahega ning kolmandaks keskmise vananemisteguri korrutis ajavahemikuga detaili valmimise momendist alates. Detaili vea ruutkeskmise hälbe $\sigma_{\eta i}(t)$ saamiseks võtame ruutjuure avaldise (3. 3. 4) vasakust ja paremast poolest:

$$\sigma_{\eta i}(t) = +\sqrt{\sigma^2_{\alpha i} + \sigma^2_{\beta i}(T - T_0)^2 + \sigma^2_{\gamma i}t^2}. \quad (3.3.15)$$

Dispersiooni ja ruutkeskmise hälbe vahelise seose põhjal kujutab $\sigma_{\alpha i}$ endast tehnoloogilise vea ruutkeskmist hälvet, $\sigma_{\beta i}$ on temperatuuriteguri ruutkeskmine hälve ja $\sigma_{\gamma i}$ vananemisteguri ruutkeskmine hälve. Valemi (3. 3. 15) abil võime leida detaili vea ruutkeskmise hälbe igasugusel temperatuuril ja igal ajamomendil, kui on teada need kolm suurust.

N ä i d e 3. 3. 1. Analüüsime pikemalt üht näidet. Selletaolisi ülesandeid esineb arendustööde käigus sageli. Käsiraamatutest leiame järgmisi andmeid (kile)takistite kohta:

a) takisteid valmistatakse igasuguse neljakohalise täpsusega antud nimiväärtustega;

b) lubatud kõrvalekaldumised nimiväärtusest on kas $\pm 0{,}5\%$ või $\pm 1{,}0\%$;

c) $\pm 0{,}5\%$-lisi takisteid on võimalik tellida ainult teatud osa (50%) üldkogusest;

d) A-grupi takistite temperatuuritegur on $-1{,}2 \cdot 10^{-2}\%/°C$; B-grupi takistite temperatuuritegur on $-2 \cdot 10^{-2}\%/°C$;

e) takistite garanteeritud teenistusiga on 5000 h;

f) takistuse muutumine teenistusea vältel ei ole üle $\pm 1{,}5\%$.

Käsiraamatus puuduvad andmed takistuse (või tema vea) jaotuse, matemaatilise ootuse, ruutkeskmise hälbe jne. kohta.

On vaja arvutada $\pm 0{,}5\%$-lise A-grupi takisti maksimaalne viga usaldatavusega 99,73% (teiste sõnadega «3σ-reegli» järgi) 2000 tunni möödudes $+50°$ C juures.

Takistuse matemaatilise ootuse ja dispersiooni leidmiseks peame kasutama valemeid (3. 3. 13) ja (3. 3. 14), võttes $T - T_0 = 50 - 20 = 30°$ C ja $t = 2000$ h. Nende valemite rakendamiseks peame teadma tehnoloogilise vea, temperatuuriteguri ja vananemisteguri matemaatilist ootust ja dispersiooni, milleks omakorda on vaja teada nende suuruste jaotusseadust. Püüame neid seadusi määrata nende väheste andmete abil, mida leidsime käsiraamatust, või täpsemalt — püüame valida jaotusseaduse, millele need suurused kõige tõenäolisemalt võiksid alluda.

Kuna takisteid valmistatakse igasuguse nimiväärtusega (punkt *a*), kuid $\pm 0{,}5\%$-lise täpsusega takistid moodustavad siiski ainult osa valmistatavatest takistitest (punkt *c*), on põhjust arvata, et takistite valmistamise automaatliin on häälestatud vajalikule nimiväärtusele, kusjuures suuremad kui $\pm 1{,}0\%$ kõrvalekaldumised nimiväärtusest esinevad harva. On teada, et säärasel juhul on takistuse jaotus tavaliselt normaalne. Valmistatud takistitest valitakse välja täpsemad veaga kuni $\pm 0{,}5\%$. Nende takistite takistuse jaotus on ühtlasele jaotusele lähedasem kui normaaljaotusele. Sellepärast loeme tehnoloogilise vea ühtlaselt jaotunuks matemaatilise ootusega

$m_\alpha = 0$ ja ruutkeskmise hälbega $\sigma_\alpha = \dfrac{0{,}5}{\sqrt{3}}$. Siit $\sigma_\alpha^2 = 0{,}083$.

A- ja B-grupi takistite temperatuuriteguri väärtuste üleskirjutusviis (ja fakt, et ei ole võimalik valmistada takisteid, mille temperatuuritegur oleks täpselt $-1{,}2 \cdot 10^{-2}\%/°C$ või $-2{,}0 \cdot 10^{-2}\%/°C$) viib meid järelduselе, et takistite jagamine gruppidesse on toimunud valmistakistite temperatuuriteguri kontrollimise teel, kusjuures kõik takistid, mille temperatuuritegur on väiksem kui $-1{,}6 \cdot 10^{-2}\%/°C$ (see on vahemiku $-1{,}2 \cdot 10^{-2} \ldots -2{,}0 \cdot 10^{-2}$ keskpunkt!) kuuluvad B-gruppi, ülejäänud A-gruppi. Loeme sellepärast, et A-grupi takistite temperatuuriteguri jaotus on ühtlane matemaatilise ootusega $m_\beta = -1{,}2 \cdot 10^{-2}\%/°C$, maksimaalse hälbega $0{,}4 \cdot 10^{-2}\%/°C$ ja ruutkeskmise hälbega $\sigma_\beta = \dfrac{0{,}4 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{3}}\%/°C$. Siit $m_\beta(T - T_0) = -1{,}2 \cdot 10^{-2} \cdot 30 = -0{,}36$ ja $\sigma_\beta^2 (T - T_0)^2 = \left(\dfrac{0{,}4 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{3}}\right)^2 30^2 = 0{,}0048$.

Mis puutub vananemistegurisse, siis analoogiliste raadiodetailide vananemise uurimine annab alust lugeda teda normaalselt jaotunuks, kusjuures ruutkeskmine viga oleks kolm korda väiksem maksimaalsest veast $\pm 1{,}5\%$ (5000 tunni jooksul). Matemaatiline ootus $m_\nu = 0$, kuna maksimaalne hälve on sümmeetriline punkti 0 suhtes. Niisiis $5000\sigma_\nu = \dfrac{1{,}5}{3} = 0{,}5$ ja $\sigma_\nu = \dfrac{0{,}5}{5000}$. Lõpuks $\sigma_\nu t = \dfrac{0{,}5 \cdot 2000}{5000} = 0{,}2$ ja $\sigma_\nu^2 t^2 = 0{,}04$.

Asetades need väärtused valemitesse (3. 3. 13) ja (3. 3. 14) võime leida, et

$$m_\eta(2000) = -0{,}360 + 0 = -0{,}360$$

ja

$$\sigma_\eta^2(2000) = 0{,}0833 + 0{,}0048 + 0{,}0400 = 0{,}1281.$$

Edasi

$$\sigma_\eta(2000) = 0{,}358\%.$$

Me ei eksi palju, kui loeme tsentraalsete piirteoreemide põhjal takisti vea jaotuse pärast 2000 tunni möödumist 50° C juures normaalseks. Siis on takisti viga usaldatavusega 99,7% vahemikus.

$$[m_\eta(2000) - 3\sigma_\eta(2000)] \ldots [m_\eta(2000) + 3\sigma_\eta(2000)]$$

või arvuliselt

$$[-0{,}360 - 3 \cdot 0{,}358] \ldots [-0{,}360 + 3 \cdot 0{,}358].$$

Niisiis, takistite viga saab tõenäosusega 0,9973 vahemikus (—1,434, 0,714%). On huvitav välja selgitada, millise osa takistite takistus kahe tuhande tunni möödudes +50° C juures asub vahemikus (—0,5% ... +0,5%). Selleks peame arvutama integraali

$$S = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-0{,}5}^{+0{,}5} \exp\left[-\frac{z - m(2000)}{2\sigma_\eta^2(2000)} \right] dz.$$

Kasutades asendust (normeeritud muutujat)

$$u = \frac{z - m_\eta(2000)}{\sigma_\eta(2000)},$$

võime selle integraali kirjutada kujul

$$S = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{0{,}5 - m_\eta(2000)}{\sigma_\eta(3000)}}^{\frac{0{,}5 - m_\eta(2000)}{\sigma_\eta(2000)}} \exp\left[-\frac{u^2}{2} \right] du$$

ja edasi

$$S = \Phi\left[\frac{0{,}5 - m_\eta(2000)}{\sigma_\eta(2000)} \right] - \Phi\left[\frac{-0{,}5 - m_\eta(2000)}{\sigma_\eta(2000)} \right] =$$

$$= \Phi(2{,}41) - \Phi(-0{,}39),$$

kus funktsiooni Φ väärtused leitakse tabelist lisas II. Sealt võib määrata, et

$$S = 0{,}9920 - 0{,}3484 = 0{,}6436$$

ehk, teiste sõnadega, umbes 64% takistite viga jääb vahemikku (—0,5%, +0,5%).

Me tegime arvutustes terve rea mööndusi, mille põhjendatus võib matemaatikule tunduda kahtlasena (jaotusseaduste valik, tsentraalsete piirteoreemide kasutamine väikese arvu liidetavate juures). Kuid juhime veel kord tähelepanu kahele asjaolule: algandmete puudulikkusele ja arvutuste suhtelisele lihtsusele. Algandmete puudulikkus ja ebatäpsus teeb absurdseks täpsemate matemaatiliste seoste kasutamise, teisest küljest aga õigustab tehtud mööndusi. Ning elektroonikaaparatuuri inseneri ja konstruktori jaoks on üheks tähtsamaks matemaatiliste vahendite kõlblikkuse kriteeriumiks nende lihtsus. Samal ajal jäävad kirjeldatud meetodile omaseks mõõtmisvigade analüüsi statistiliste meetodite eelised.

Asetades avaldise (3. 3. 8) avaldisse (3. 3. 3), saame järgmise tulemuse:

$$\varrho(t) = \sum_{i=1}^{n} B(\zeta; \xi_i)\alpha_i + (T - T_0) \sum_{i=1}^{n} B(\zeta; \xi_i)\beta_i + \\ + t \sum_{i=1}^{n} B(\zeta; \xi_i)\gamma_i. \qquad (3.3.16)$$

Praktilistes arvutustes huvitab meid vea $\varrho(t)$ matemaatiline ootus $m_\varrho(t)$, dispersioon $\sigma_\varrho^2(t)$ ja vea ruutkeskmine hälve $\sigma_\varrho(t)$. Me peame need suurused avaldama detaile iseloomustavate suuruste $m_{\alpha i}$, $m_{\beta i}$, $m_{\gamma i}$, $\sigma_{\alpha i}$, $\sigma_{\beta i}$ ja $\sigma_{\gamma i}$ kaudu (vt. valemeid (3. 3. 13) ja (3. 3. 14).

Me eeldame, et i-nda parameetri vea väärtus ei sõltu sellest, milline on j-nda parameetri vea väärtus, s. t. eeldame, et erinevate detailide parameetrite vahel korrelatsioon puudub. Paljudel juhtudel on selline eeldus vastuvõetav. Edasi eeldame, et parameetri tehnoloogiline hajumine, temperatuuritegur ja vananemiskiirus ei mõjuta üksteist, s. t. eeldame, et puudub korrelatsioon α_i, β_i ja γ_i vahel. Esimeses lähenduses on see vastuvõetav. Siis pole raske leida $m_\varrho(t)$ ja $\sigma_\varrho^2(t)$ tõenäosusteooria lihtsaimate teoreemide abil.

Tähistame

$$\sum_{i=1}^{n} B(\zeta; \xi_i)\alpha_i = \vartheta, \qquad (3.3.17)$$

$$\sum_{i=1}^{n} B(\zeta; \xi_i)\beta_i = \iota \qquad (3.3.18)$$

$$\sum_{i=1}^{n} B(\zeta; \xi_i)\gamma_i = \nu. \qquad (3.3.19)$$

Pole raske mõista, et ϑ on mõõteriista juhuslik tehnoloogiline viga, ι on vea juhuslik temperatuuritegur ja ν vea juhuslik vananemistegur. Kasutades neid tähiseid saame me valemist (3. 3. 16):

$$\varrho(t) = \vartheta + \iota(T - T_0) + \nu t. \qquad (3.3.20)$$

Kui tähistada

$$\vartheta + \iota(T - T_0) = \varkappa, \qquad (3.3.21)$$

lihtsustub valemi (3. 3. 16) kuju veelgi:

$$\varrho(t) = \varkappa + \nu t. \qquad (3.3.22)$$

Näeme, et ka näidu viga on aja juhuslik lineaarne funktsioon.

Nüüd võime kirjutada:

$$m_\rho(t) = m_\vartheta + m_\iota (T - T_0) + m_\nu t \qquad (3.3.23)$$

ja

$$\sigma_\rho^2(t) = \sigma_\vartheta^2 + \sigma_\iota^2(T - T_0)^2 + \sigma_\nu^2 t^2. \qquad (3.3.24)$$

Me võime $m_\rho(t)$ ja $\sigma_\rho^2(t)$ avaldada ka teisiti:

$$m_\rho(t) = m_\varkappa + m_\nu t; \qquad (3.3.25)$$

$$\sigma_\rho^2(t) = \sigma_\varkappa^2 + \sigma_\nu^2 t. \qquad (3.3.26)$$

Mõõteriista tehnoloogilise vea matemaatiline ootus m_ϑ ja dispersioon σ_ϑ^2, temperatuuriteguri matemaatiline ootus m_ι ja dispersioon σ_ι^2 ning vananemisteguri matemaatiline ootus m_ν ja dispersioon σ_ν^2 väljenduvad detailiiseloomustavate vastavate suuruste kaudu järgmiselt:

$$m_\vartheta = \sum_{i=1}^{n} B(\xi; \xi_i)\, m_{\alpha i}; \qquad (3.3.27)$$

$$m_\iota = \sum_{i=1}^{n} B(\xi; \xi_i)\, m_{\beta i}; \qquad (3.3.28)$$

$$m_\nu = \sum_{i=1}^{n} B(\xi; \xi_i)\, m_{\gamma i}; \qquad (3.3.29)$$

$$\sigma_\vartheta^2 = \sum_{i=1}^{n} [B(\xi; \xi_i)]^2 \sigma_{\alpha i}^2; \qquad (3.3.30)$$

$$\sigma_\iota^2 = \sum_{i=1}^{n} [B(\xi; \xi_i)]^2 \sigma_{\beta i}^2; \qquad (3.3.31)$$

$$\sigma_\nu^2 = \sum_{i=1}^{n} [B(\xi; \xi_i)]^2 \sigma_{\gamma i}^2. \qquad (3.3.32)$$

Analoogiliselt

$$m_\varkappa = \sum_{i=1}^{n} B(\xi; \xi_i)\, m_{\delta i}; \qquad (3.3.33)$$

$$\sigma_\varkappa{}^2 = \sum_{i=1}^{n} [B(\xi; \xi)]^2 \sigma_{\delta i}. \qquad (3.3.34)$$

Näeme, et valemite (3.3.23), (3.3.24), (3.3.27) ... (3.3.32) järgi on võimalik arvutada näidu vea matemaatilist ootust (keskmine viga) ja dispersiooni, kui teame detailide tehnoloogilise hajumise, temperatuuriteguri ja vananemisteguri matemaatilist ootust ja dispersiooni.

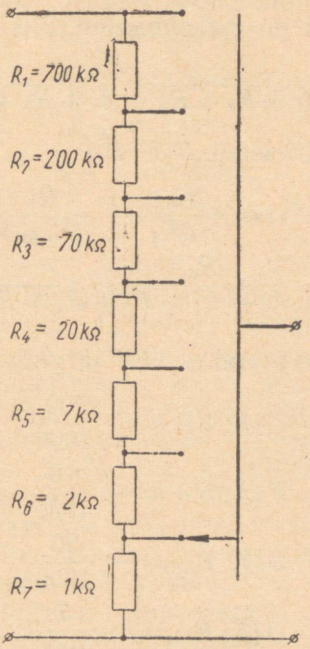
Juhime tähelepanu sellele, et valemid (3.3.23) ja (3.3.24) peegeldavad nii detailide tehnoloogilise hajumise kui ka ümbritseva õhu temperatuuri ja vananemise mõju mõõteriistade veale. Kuid jättes nende valemite parematesse pooltesse ainult vastavad liikmed, võime arvutada mõõteriista vea matemaatilise ootuse ja dispersiooni kohe pärast valmistamist ($t = 0$), standardsel temperatuuril ($T - T_0 = 0$), ainult tehnoloogilise vea ($t = 0$, $T - T_0 = 0$) jne.

Joonisel 3.3.2 on toodud näitena raadioelektronmõõteriistades laialdaselt kasutatava pingejaguri skeem. Pinge jagamine toimub suhtes 1000 : 300 : 100 : 30 : 10 : 3 : 1. Pingejaguris kasutatakse ühesuguse suhtelise täpsusega valmistatud takisteid, mille kohta on teada, et nende keskmine viga (õigemini vea matemaatiline ootus) on 0. Takisti vea ruutkeskmine hälve protsentides (siin võib kasutada ka terminit «ruutkeskmine viga») on σ. Leida pingejagamisteguri ruutkeskmine hälve (ruutkeskmine viga) kõikide pingejagamisteguri väärtuste jaoks standardsel temperatuuril vananemist arvestamata.

Selles näites pole tegemist mitte mõõteriista kui tervikuga, vaid ühe osaga, mis aga ei takista eespool toodud metoodika kasutamist.

Me peame kasutama valemeid (3.3.23) ja (3.3.24), jättes neis alles ainult esimese liikme, mis iseloomustab tehnoloogilist hajumist. Kuid valemist (3.3.27) on näha, et kui $m_{\alpha i} = 0$, siis ka $m_\vartheta = 0$ ja $m_\rho = 0$. Kasutades valemit (3.3.30), võime valemi (3.3.24) kirjutada kujul

$$\sigma_\rho{}^2 = \sum_{i=1}^{n} [B(\xi; \xi_i)]^2 \sigma_{\alpha i}^2.$$



Joon. 3. 3. 2. Pingejaguri skeem.

Kirjutame valemid vajalikul kujul. Valemi (3. 3. 1) asemel saame:

$$K = f(R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7),$$

kus K on pingejagamistegur. Valemi (3. 3. 6) asemel kirjutame:

$$B(K; R_i) = \frac{\partial K}{\partial R_i}\Big|_0 \frac{R_{i0}}{K_0}$$

ning lõpuks

$$\sigma_h^2 = \sigma^2 \sum_{i=1}^{n} [B(K; R_i)]^2,$$

kuna

$$\sigma_{\alpha i} = \sigma.$$

Pingejagamistegur sõltub antud juhul lüliti asendist (vt. joon. 3. 3. 2) ning loomulikult sõltub ka pingejaga-

misteguri viga pingejagamisteguri väärtusest. Oletame, et pingejagamine on maksimaalne. Siis

$$K_{0,001} = \frac{R_7}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7}.$$

Leiame mõjukoefitsiendi $B(K; R_1)$:

$$B(K; R_1) = \frac{\partial K_{0,001}}{\partial R_1}\Bigg|_0 \frac{R_1}{(K_{0,001})} =$$

$$= \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7} = \frac{700}{1000}.$$

Analoogiliselt arvutatakse viis järgmist mõjutegurit:

$$B(K; R_2) = -\frac{200}{1000};$$

$$B(K; R_3) = -\frac{70}{1000};$$

$$B(K; R_4) = -\frac{20}{1000};$$

$$B(K; R_5) = -\frac{7}{1000};$$

$$B(K; R_6) = -\frac{2}{1000}.$$

Eelmistest erineva avaldise saame mõjuteguri $B(K; R_7)$ jaoks, kuna diferentseerides tuleb silmas pidada, et mitte ainult nimetaja, vaid ka lugeja sisaldab R_7:

$$B(K; R_7) = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7} = \frac{999}{1000}.$$

Kasutades arvestatud väärtusi, leiame pingejagamisteguri dispersiooni

$$\sigma^2_{0,001} = \frac{\sigma^2}{(1000)^2}(700^2 + 200^2 + 70^2 + 20^2 + 7^2 + 2^2 + 999^2) =$$

$$= 1{,}533\sigma^2.$$

Kui pingejagamistegur on 3 : 1000, 10 : 1000 jne., saame mõjuteguri jaoks teised avaldised. Me kirjutame välja vaid tulemused:

$$\sigma^2_{0,003} = 1{,}087\sigma^2;$$
$$\sigma^2_{0,01} = 1{,}064\sigma^2;$$
$$\sigma^2_{0,03} = 1{,}014\sigma^2;$$
$$\sigma^2_{0,1} = 0{,}963\sigma^2;$$
$$\sigma^2_{0,3} = 0{,}737\sigma^2.$$

Me näeme valemist (3. 3. 16), et näidu viga $\varrho(t)$ moodustub juhuslike muutujate summast, kus iga liidetav sisaldab detaili vea korrutise vastava mõjuteguriga. Nende detailide arv n, mille parameeter vahetult mõjutab näitu, on mõõteriistades harva alla 3 või 4. Kui me veel arvestame seda, et iga detaili viga moodustub tehnoloogilisest, temperatuurilisest ja ajalisest komponendist, siis tuleme järeldusele, et liikmete arv summas (3. 3. 16) on mitte alla 10. Praktiliselt on esinevatel juhtudel liikmed enam või vähem ühes suurusjärgus. Kuid neil eeldustel võime kasutada tõenäosusteooria nn. tsentraalseid piirteoreeme, mis väidavad, et suure hulga enam või vähem ühesuguses suurusjärgus juhuslike muutujate summa on jaotunud normaalselt, kusjuures summa matemaatiline ootus ja dispersioon määratakse valemitega (3. 3. 23). . . (3. 3. 34).

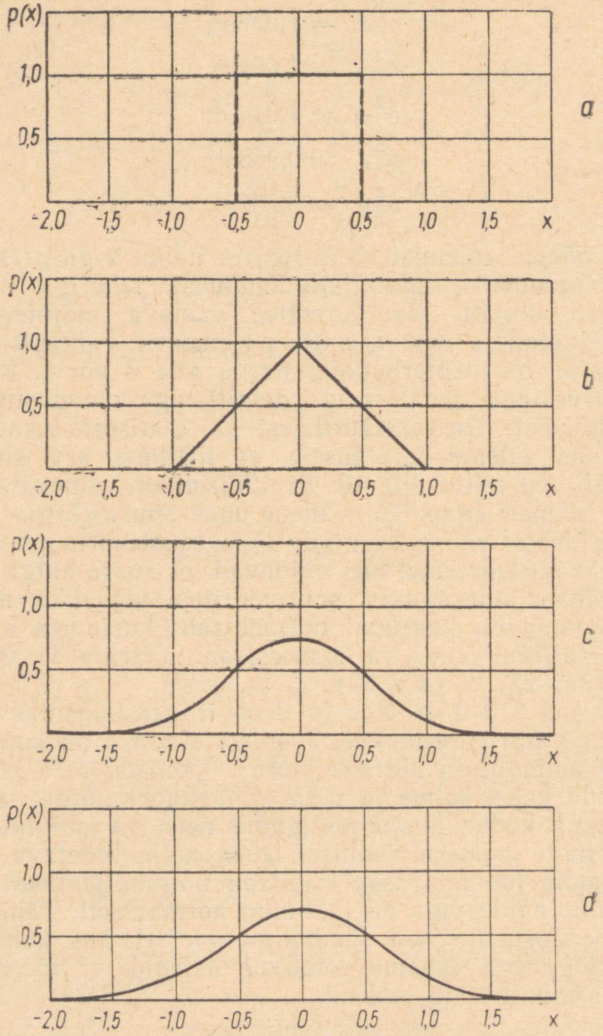
Joonised 3. 3. 3, *a*, *b*, *c* ja *d* on illustratsiooniks tsentraalsetele piirteoreemidele. Joonisel 3. 3. 3, *a* on kujutatud juhusliku muutuja ühtlane jaotus. Joonistel *b*, *c* ja *d* on näidatud kahe, kolme ja nelja juhusliku muutuja summa tõenäosustihedus, kusjuures igaüks neist on jaotunud ühtlaselt nagu esimesel joonisel. Juba nelja liidetava puhul on summa jaotust raske eraldada normaaljaotusest.

Niisiis, näidu viga on jaotunud normaalselt. Tähistame vea tõenäosustiheduse sümboliga $p[r(t)]$, kus kahekordsete sulgudega tahame rõhutada asjaolu, et tõenäosustihedus muutub aja jooksul.

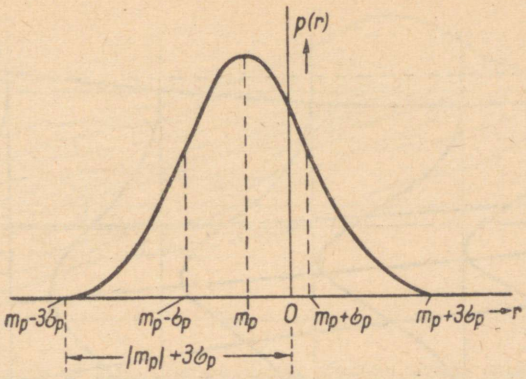
Siis

$$p[r(t)] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\rho(t)} \exp\left\{ -\frac{[r - m_\rho(t)]^2}{2\sigma_\rho^2(t)} \right\}, \quad (3.3.35)$$

kus $m_\rho(t)$ ja $\sigma^2_\rho(t)$ määratakse valemitega (3. 3. 23) . . . (3. 3. 34). Näidu vea jaotuse tõenäosustihedus $p(r)$ tea-



Joon. 3.3.3. Graafikud tsentraalsete piirteoreemide illustreerimiseks



Joon. 3. 3. 4. Mõõteriista vea jaotus kindlal ajamomendil

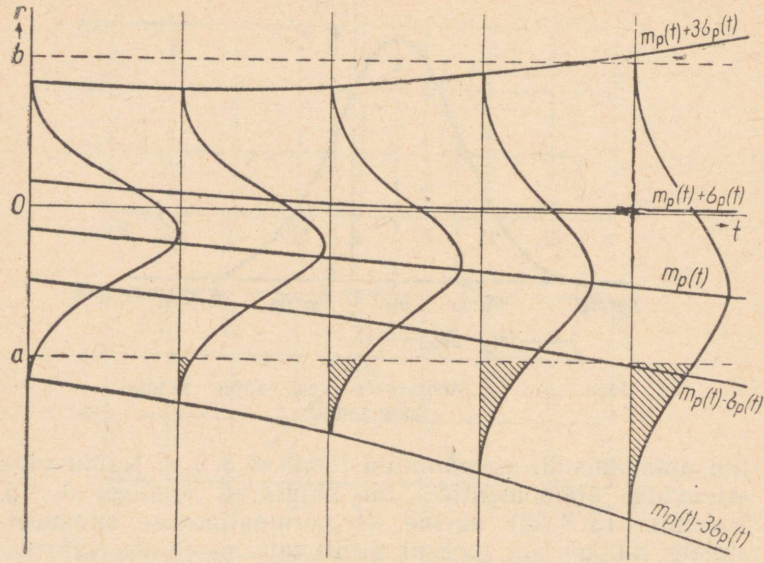
tud ajamomendil on näidatud joonisel 3. 3. 4. Näidu viga erinevatel ajamomentidel on kujutatud joonisel 3. 3. 5. Valemist (3. 3. 25) näeme, et normaaljaotuse sümmeetriatelg nihkub aja jooksul (sõltuvalt m_γ ja m_ν väärtustest) ühele või teisele poole. Valemist (3. 3. 26) on näha, et normaaljaotuse dispersioon aja jooksul kasvab, teiste sõnadega normaaljaotuse tõenäosustiheduse graafik muutub lamedamaks.

Oletame, et näidu lubatud viga negatiivses suunas on a $(a<0)$ ja positiivses suunas $b\,(b>0)$. Teiste sõnadega, mõõteriist loetakse töövõimeliseks, kui näidu viga asub vahemikus (a, b), ja mittetöövõimeliseks, kui näidu viga on väiksem kui a või suurem kui b. Kui näidu viga on väljaspool vahemikku (a, b), tekib tõrge. Joonisel 3. 3. 5 on punktiiriga tähistatud näidu vea lubatud väärtused a ja b; viirutatud pindala vastab tõenäosusele, et viga on väljaspool lubatud väärtusi. Kasutades valemit (3. 3. 35), võime leida aeglaste tõrgete puudumise tõenäosuse

$$S(t)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\rho(t)}\int_a^b \exp\left\{-\frac{[r-m_\rho(t)]^2}{2\sigma_\rho^2(t)}\right\}dr, \quad (3.3.36)$$

kasutades selleks vigade integraali

$$\Phi(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{x}\exp\left[-\frac{u^2}{2}\right]du$$



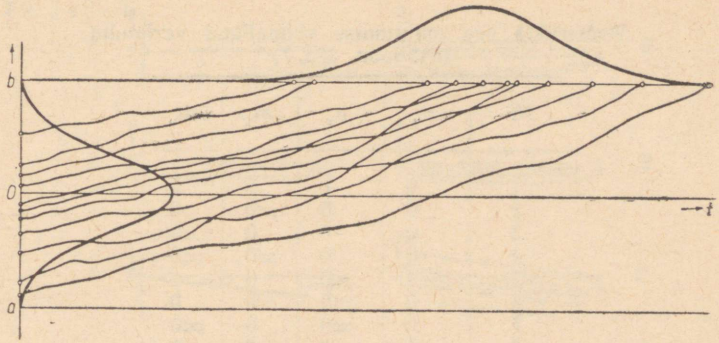
Joon. 3. 3. 5. Mõõteriista viga erinevatel ajamomentidel

tabelit (vaata lisa II) ja valemit

$$S(t) = \Phi\left[\frac{b - m_\rho(t)}{\sigma_\rho(t)}\right] - \Phi\left[\frac{a - m_\rho(t)}{\sigma_\rho(t)}\right]. \quad (3.3.37)$$

Nagu nägime esimeses peatükis, on järskude tõrgete korral tõrketu tööaeg jaotunud eksponentsiaalselt, kust siis tuleb tõrkeintensiivsuse konstantsus. Leiame mõõteriista tõrketu tööaja jaotuse tiheduse eeldusel, et kõikide detailide vananemist aproksimeeritakse erineva algordinaadi ja erineva tõusuga kiirtega.

Joonisel 3. 3. 6 on kujutatud teatud arvu mõõteriistade näidu vea muutumine aja jooksul. Punktid ordinaatteljel tähistavad näidu vea esialgset väärtust ajamomendil $t = 0$. Nende punktide tihedust ordinaatteljel iseloomustab sellele teljele joonistatud tõenäosustiheduse kõver, mis, nagu me veendusime, peab olema normaaljaotuse kõver. Joonisel on vea maksimaalselt lubatud väärtused märgitud ühele ja teisele poolele (a ja b). Ülemisel sirglõigul on näidatud punktid, mil näidu viga saab väärtuse b,



Joon. 3.3.6. Vea jaotus ja tõrketu tööaja jaotus

teiste sõnadega, on toodud tõrke tekkimise momendid. Punktide tihedus ülemisel sirglõigul on samal ajal aeglaste tõrgete tekkimise tõenäosustihedus. Meid huvitab, milline on tõrketu tööaja jaotuse tõenäosustihedus juhul, kui näidu viga muutub lineaarselt normaaljaotusega algordinaadi ja normaaljaotusega tõusu korral.

Tähistame aeglaste tõrgete tõenäosustiheduse (tõrketu tööaja jaotuse tiheduse) tähisega $f(t)$. Valemi (1.1.6) järgi on

$$f(t) = -\frac{dS(t)}{dt},$$

kus S(t) määratakse valemiga 3.3.36. Kuigi on võimalik leida $f(t)$ analüütiline avaldis, piirdume ainult mõningate lihtsamate erijuhtude vaatlemisega.

Valemite (3.3.25) ja (3.3.26) järgi määratakse näidu matemaatiline ootus $m_\rho(t)$ ja dispersioon $\sigma^2_\rho(t)$ nelja suurusega $m_\varkappa$, m_ν, $\sigma_\varkappa^2$ ja σ_ν^2. Suurus m_ν on matemaatilise ootuse väärtus algmomendil $t = 0$, m_ν iseloomustab matemaatilise ootuse muutumise kiirust, σ_ν^2 on näidu dispersioon algmomendil ning σ_ν^2 võib samuti vaadelda kui suurust, mis iseloomustab dispersiooni kasvamise kiirust. Üldjuhul on kõik neli suurust nullist erinevad, kuid konkreetsete mõõteriistade jaoks võib mõni neist suurustest olla teistega võrreldes niivõrd väike, et me ei eksi palju, kui loeme ta võrdseks nulliga. Tabelis 3.3.1 on näidatud kõik seejuures esinevad kombinatsioonid. Tabelile 3.3.1 vastab joonis 3.3.7, kus laia joonega

Tabel 3.3.1

Mõõteriista vea muutumise võimalikud variandid (vt. joon. 3.3.7)

№	σ_x	σ_v	m_x	m_v
1	0	0	0	0
2	0	0	$\neq 0$	0
3	0	0	0	$\neq 0$
4	0	0	$\neq 0$	$\neq 0$
5	0	$\neq 0$	0	0
6	0	$\neq 0$	$\neq 0$	0
7	0	$\neq 0$	0	$\neq 0$
8	0	$\neq 0$	$\neq 0$	$\neq 0$
9	$\neq 0$	0	0	0
10	$\neq 0$	0	$\neq 0$	0
11	$\neq 0$	0	0	$\neq 0$
12	$\neq 0$	0	$\neq 0$	$\neq 0$
13	$\neq 0$	$\neq 0$	0	0
14	$\neq 0$	$\neq 0$	$\neq 0$	0
15	$\neq 0$	$\neq 0$	0	$\neq 0$
16	$\neq 0$	$\neq 0$	$\neq 0$	$\neq 0$

on näidatud matemaatilise ootuse ajaline muutumine, aga neli kitsast joont on neli näidu vea muutumise realisatsiooni, mis annavad ettekujutuse dispersiooni muutumisest (hajumisest) aja jooksul.

Variandid 1 . . . 4 on triviaalsed. Aeglaste tõrgete puudumise tõenäosus on variantide 9 ja 10 puhul konstantne, variantide 11 ja 12 puhul on aeglaste tõrgeteta tööaeg jaotunud normaalselt, kusjuures selle jaotuse parameetrid on kergesti määratavad näidu vea normaaljaotuse parameetrite kaudu ajamomendil $t = 0$. Kui tähistada keskmist aeglaste tõrgeteta tööaega tähisega t_k, siis

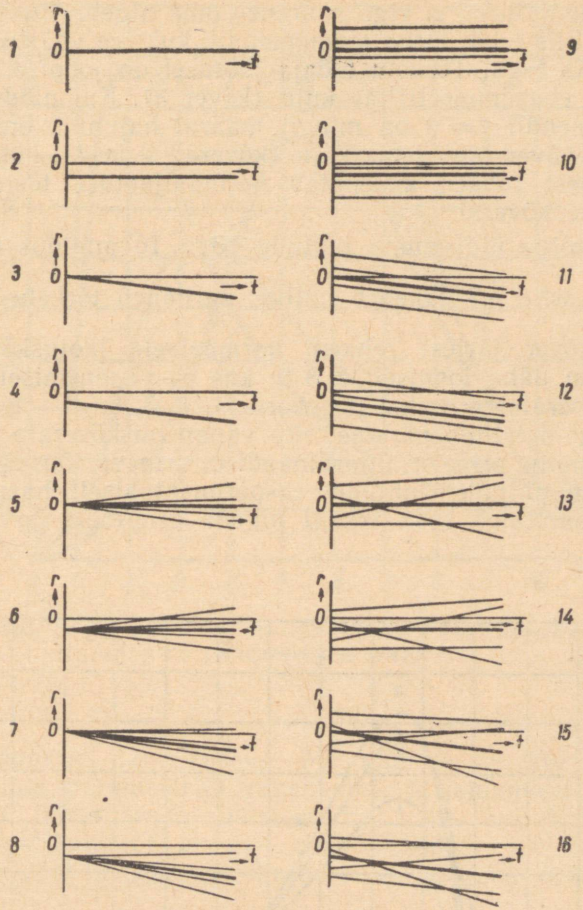
$$t_k = \frac{b - m_x}{m_v}$$

või

$$t_k = \frac{m_x - a}{m_v}$$

olenevalt sellest, kas $m_v \geqslant 0$ või $m_v < 0$. Tähistame tõrketu tööaja dispersiooni tähisega σ_t^2. Siis

$$\sigma_t^2 = \frac{\sigma_v^2}{m_v^2}.$$



Joon. 3.3.7. Mõõteriista vea muutumise võimalikud variandid

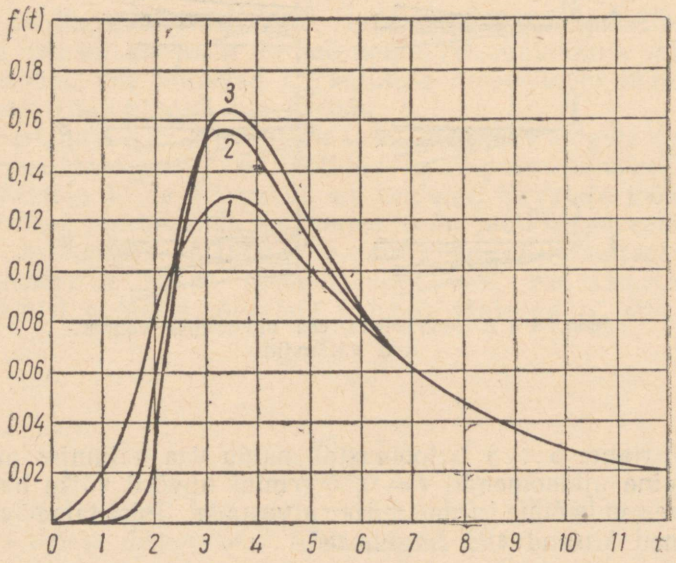
Variante 5...8 iseloomustab näidu vea hajumise puudumine ajamomendil $t = 0$, õigemini niivõrd väike hajumine, et võime seda mitte arvestada. Püstitame veel mõned kitsendavad tingimused.

Kogemused näitavad, et paljudel juhtudel muutub mõõteriista näidu viga ühes suunas, kuid erineva kiirusega.

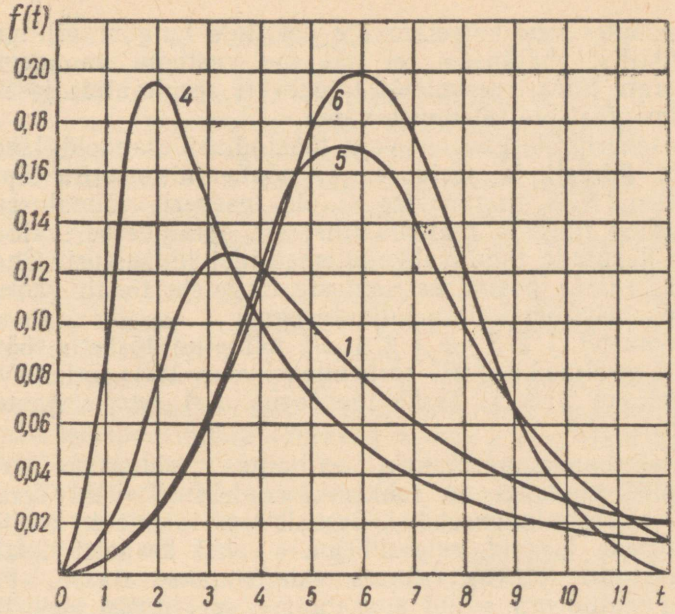
Oletame näiteks, et viga suureneb oma algebraliselt väärtuselt. Siis tekib tõrge ajamomendil, kui vea väärtus saab võrdseks b-ga. Tõrketu tööaja jaotusel on joonisel 3. 3. 8 toodud ebasümmeetriline kuju (kõver 3). Kui näidu viga ajamomendil $t = 0$ on mingil määral hajunud, omandab vastav kõver lamedama kuju (kõverad *2* ja *1*), kusjuures ta järjest rohkem meenutab normaaljaotuse tõenäosustiheduse kõverat.

Ka kõige üldisemate juhtude 13 ... 16 analüüs näitab, et kui suhe $\frac{\sigma_v}{\sigma_x}$ läheneb nullile, sarnaneb tõrketu tööaja jaotuskõver järjest rohkem normaalsele jaotuskõverale. Seda on näha jooniselt 3. 3. 9, kus σ_v vähenemisele vastab kõverate järgmine järjekord: 4, 1, 5, 6.

Kuigi detailide parameetrite vananemiskõverate aproksimeerimine erineva algordinaadi ja erineva tõusuga kiirtega on paljudel juhtudel eksperimentaalselt hästi põhjendatud, tuleb seda ikkagi lugeda esimeseks ja küllalt



Joon. 3. 3. 8. Tõrketu tööaja jaotus vananemiskõverate lineariseerimise korral



Joon. 3.3.9. Tõrketu tööaja jaotus vananemiskõverate lineariseerimise korral

ligikaudseks lähenduseks. Me nägime, et kui lähtume detailide parameetrite vananemise kirjeldamisel lineaarsetest juhuslikest funktsioonidest, siis üldjuhul saame normaaljaotusest erineva tõrketu tööaja jaotuse. Kuid samal ajal nägime, et tehnilisest seisukohast küllalt täht-

satel juhtudel, nimelt kui suhe $\frac{\sigma_v}{\sigma_x}$ on küllalt väike, ei erine tõrketu tööaja jaotus tunduvalt normaaljaotusest.

Raadiodetailide aeglaste tõrgete tekkimise momentide, õigemini aeglaste tõrgeteta tööaja jaotuse kohta kogutud eksperimentaalne materjal on hästi kirjeldatav normaaljaotuse abil. Nende eksperimentaalsete tulemuste tõlgitsemisel ei tehta harilikult mingeid oletusi detaili parameetri muutumise käigu kohta ja vastupidi: kui tuuakse detaili parameetri ajalise muutumise käik, siis ei ole püütud analüüsida võimalikku tõrketu tööaja jaotust.

Arvestades veel katsetatavate detailide hulgast sõltuvaid statistilisi ebatäpsusi, ei näe me vastuolu vananemiskõverate lineariseerimisest tulenevate resultaatide ja eksperimentaalsete tulemuste vahel.

Inseneripraktikas on vaja töökindlusülesandeid lahendada kiiresti ja seejuures ei nõuta mitte eriti täpset vastust. Neis tingimustes ei ole inseneril võimalust ja vajadust tungida matemaatilistesse detailidesse, vaid ta võib kasutada tunduvaid matemaatilisi lihtsustusi. Üheks lihtsustuseks peame ka aeglaste tõrgeteta tööaja jaotuse aproksimeerimist normaaljaotusega.

Joonistel 1.2.3 ja 1.2.4 oli näidatud tõrketu tööaja tõenäosustihedus $f(t)$, tõrkeintensiivsus $\lambda(t)$, tõrketu töö tõenäosus $p(t)$ ja tõrke tõenäosus $q(t)$ normaaljaotuse korral.

Elektroonikaaparatuuris, sealhulgas muidugi ka elektronmõõteriistades on rohkem komplekteeritavaid detaile — elektrovaakuumseadisi, transistore, takisteid, kondensaatoreid, lüliteid, releesid jne. — kui ka teisi detaile. Aparatuuri tootvas tehases valmistatakse šassii, kast ning teatud osa antud aparatuurile spetsiifilisi elektrilisi või elektromehaanilisi detaile. Tootmisprotsess kujutab endast põhiliselt monteerimist. Kuid majanduslikult on ebaotstarbekohane kasutada niivõrd täpseid detaile, et mõõteriista näidu viga vahetult pärast monteerimise lõpetamist montaažitsehhides asuks lubatud vahemikus. Ka on praktiliselt võimatu kindlustada mitmesuguste parasiit-montaažimahtuvuste, parasiitjuhtivuste ja -induktiivsuste konstantseid väärtusi kõikide eksemplaride jaoks. Loetletud põhjustel on mõõteriista viga pärast monteerimise lõpetamist reeglina erinev tehniliste tingimustega lubatud väärtustest. Monteerimisele järgneva häälestamise käigus muudetakse ühe või mitme detaili (potentsiomeetri, trimmeri, liikuva südamikuga induktiivpooli jne.) väärtust senikaua, kuni näidu viga omandab ühe lubatud väärtustest. Vaatleme, mis muutub meie valemites juhul, kui meil on tegemist reguleeritava aparatuuriga.

Anda detaili reguleeritavale parameetrile selline väärtus, et mõõteriista näidu viga oleks täpselt võrdne nulliga, on praktiliselt võimatu. Sellepärast on näidu viga pärast reguleerimist juhuslik suurus μ, mida iseloomustab matemaatiline ootus m_μ ja dispersioon σ_μ^2. Ei ole

isegi nõutav, et matemaatiline ootus (keskmine viga) m_μ oleks võrdne nulliga.

Kogenud reguleerijad näiteks, teades, et näidu viga aja jooksul (algebraliselt) suureneb, «reguleerivad riista miinusesse», s. t. reguleerivad nii, et $a < m_\mu < 0$, kus a on maksimaalselt lubatud negatiivse märgiga viga. Niimoodi toimides jätab reguleerija suurema tagavara mõõteriista vananemiseks. Vea hajumine reguleerimise lõppemisel sõltub elektriskeemist, reguleeritava detaili konstruktsioonist, aga ka reguleerija kvalifikatsioonist. Muude võrdsete tingimuste juures kindlustab parem reguleerija väiksema dispersiooni σ_μ^2.

Valemitest (3. 3. 7), (3. 3. 11) ja (3. 3. 12) on näha, et kasutatud eeldustel i-nda detaili parameetri ajalist muutumist iseloomustavad suurused $m_{\nu i}$ ja $\sigma_{\nu i}^2$ ei sõltu parameetri esialgsest väärtusest. Samuti võib lugeda, et ka selle detaili mõjuteguri väärtus on parameetri mitte eriti suurte muutuste korral konstantne. Siit järeldub, et näidu vea ajast sõltuv osa jääb reguleeritava aparatuuri korral samaks, nagu ta oli mittereguleeritava aparatuuri korral ja nimelt

$$vt = t \sum_{i=1}^{n} B(\xi; \xi_i)_{\nu i}.$$

Näidu viga $\varrho(t)$ väljendub siis järgmiselt:

$$\varrho'(t) = \mu + vt.$$

Näeme, et sõltuvuse kuju ei muutu. Muutus ainult esimene liige, mille all me mõistame nüüd reguleerimisel sooritatavat (juhuslikku) viga. Sellepärast ei tee me enam vahet $\varrho(t)$ ja $\varrho'(t)$ juures, asendades vajaduse korral suuruse $\varkappa$ suurusega μ.

Siinkohal tahame tähelepanu juhtida veel ühele juhuslike funktsioonide lineariseerimisega seotud asjaolule. Kasutades neid detaili vananemise kirjeldamiseks, ei kujuta nad matemaatiliselt mitte ainult kõige lihtsamat lähendust, vaid ka lähendust, mille kasutamiseks on vaja teada miinimum katseliselt määratavaid suurusi. Detailide vananemise katseline määramine on harilikult seotud aja ja vahendite kuluga, mistõttu seda püütakse elektroonikaaparatuuri konstrueerimisbüroodes võimalikult vältida ja kasutada käsiraamatutes ning üksikutes artiklites avaldatud andmeid. Kuid need andmed on sageli puudulikud ning ebarahuldavad ja teadaolevate andmete põhjal vajalike suuruste määramine kujuneb tihti muret

tekitavaks probleemiks. Teatud abi pakub siin kindlasti allpool kirjeldatud meetod.

Valemitest (3. 3. 11) ja (3. 3. 12) nähtub, et parameetri matemaatilise ootuse $m_{\eta i}(t)$ ja dispersiooni $\sigma_{\eta i}^2(t)$ leidmiseks igal ajamomendil t on meil vaja teada nelja suurust $m_{\delta i}$, $m_{\gamma i}$, $\sigma_{\delta i}^2$ ja $\sigma_{\gamma i}^2$. Oletame, et me leidsime käsiraamatust (või määrasime katseliselt) matemaatilise ootuse ja dispersiooni kahel erineval ajamomendil t_1 ja t_2 ning saime vastavalt $m_{\eta i}(t_1)$, $m_{\eta i}(t_2)$, $\sigma_{\eta i}^2(t_1)$ ja $\sigma_{\eta i}^2(t_2)$. Siis ei ole raske tuletada järgmisi seoseid:

$$m_{\delta i} = \frac{t_2 m_{\eta i}(t_1) - t_1 m_{\eta i}(t_2)}{t_2 - t_1}; \qquad (3.3.38)$$

$$m_{\gamma i} = \frac{m_{\eta i}(t_2) - m_{\eta i}(t_1)}{t_2 - t_1}; \qquad (3.3.39)$$

$$\sigma_{\delta i}^2 = \frac{t_2^2 \sigma_{\eta i}^2(t_1) - t_1^2 \sigma_{\eta i}^2(t_2)}{t_2^2 - t_1^2}; \qquad (3.3.40)$$

$$\sigma_{\gamma i}^2 = \frac{\sigma_{\eta i}^2(t_2) - \sigma_{\eta i}^2(t_1)}{t_2^2 - t_1^2}. \qquad (3.3.41)$$

Need valemid lihtsustuvad muidugi tunduvalt, kui esimene ajamomentidest t_1 ja t_2 langeb kokku detaili valmimise momendiga, s. t. $t_1 = 0$.

Leides suurused $m_{\delta i}$, $m_{\gamma i}$, $\sigma_{\delta i}^2$ ja $\sigma_{\gamma i}^2$ valemite (3. 3. 38)... ... (3. 3. 41) abil, võime valemitega (3. 3. 11) ja (3. 3. 12) määrata detaili parameetri matemaatilise ootuse ja dispersiooni juba iga ajamomendi jaoks.

3.4. Kontrollseadmete täpsuse osa aeglaste tõrgete fikseerimisel

Raadioelektronmõõteriistade tõrgetest moodustavad nn. aeglased tõrked suure ning sageli isegi suurema osa. Nii inseneril kui ka konstruktoril tuleb paratamatult tegelda aeglase tõrke tõenäosuse (või mõne teise töökindlusparameetri) hindamisega. Aeglase tõrke puudumise tõenäosuse arvutamist detailide parameetrite abil eelmises paragrahvis toodud meetodil ja selle tõenäosuse katselist määramist peab vaatama koos. Arendustööde käigus teostatud arvutus võimaldab enam või vähem ligikaudselt

ette öelda, milline on aeglase tõrke puudumise tõenäosus ühe või teise ajavahemiku möödumisel. Tõrketu töö tõenäosuse määramine eksperimentaalselt mitte ainult ei näita mõõteriista tegelikku töökindlust, vaid kontrollib ka arendustöö käigus tehtud arvutuse õigsust ja võimaldab välja selgitada mõõteriista nõrgad kohad ning vajalikud muudatused elektriskeemis ja mehaanilises konstruktsioonis. Mõõteriistade katsetamisel töökindlusparameetrite määramiseks, aga ka muudes olukordades (näiteks tsehhis valmistatud mõõteriistade vastuvõtmisel tehnilise kontrolli osakonna poolt) kerkib projekteerijate ette probleem, mida võiks formuleerida järgmiselt: milline on katsetatavate mõõteriistade parameetrite määramiseks kasutatavate kontrollmõõteriistade täpsuse mõju kontrollimise tulemustele. Esitades sellise küsimuse, otsime vastust lihtsamate matemaatiliste seoste kujul, kuna intuitiivselt on selge, et täpsem kontrollmõõteriist võimaldab paremini vältida ebaõigeid otsuseid toote töövõimelisuse või töökõlbmatuse kohta. Oletame, et töökindluskatsete käigus teatud aeg pärast katse ülesseadmist kontrollitakse mõõteriista viga (kindla mõõdetava suuruse väärtuse juures kindlal sagedusel). Oletame, et tehniliste tingimustega lubatud näidu viga protsentides ühele või teisele poole ei tohi absoluutväärtuselt ületada δ_1 protsenti. Teiste sõnadega, kui kontrollimisel selgus, et mõõteriista viga asub vahemikus $(-\delta_1, \delta_1)$, loetakse mõõteriist töövõimeliseks; kui näidu viga algebraliselt väärtuselt oli väiksem kui $-\delta_1$ või suurem kui δ_1, loetakse mõõteriist töökõlbmatuks, teiste sõnadega, oli tekkinud tõrge.

Kuid katsetatavate mõõteriistade kontrollimiseks kasutatavad mõõteriistad — me nimetame neid kontrollmõõteriistadeks — ei ole absoluutselt täpsed, vaid ka nende mõõtmistulemuse saame teatud veaga. Reeglina on kontrollmõõteriistad muidugi täpsemad katsetatavatest mõõteriistadest. Kuid kui meil on tegemist täpsete katsetatavate mõõteriistadega (aga just täpsete mõõteriistade juures kerkib erilise teravusega üles stabiilsuse probleem, teiste sõnadega, aeglaste tõrgete probleem), esineb praktiliselt raskusi juba 2 või 3 korda täpsemate kontrollmõõteriistade saamisega, rääkimata 10 korda täpsematest kontrollmõõteriistadest.

Katsetatavate mõõteriistade kontrollimisel teeme ühe neljast otsusest:

a) mõõteriista, mille näidu viga asus vahemikus $(-\delta_1, \delta_1)$ (töövõimeline mõõteriist, sündmus A), tunnistame töövõimeliseks (sündmus B);

b) mõõteriista, mille näidu viga asus vahemikus $(-\delta_1, \delta_1)$ (töövõimeline mõõteriist, sündmus A), tunnistame töökõlbmatuks (sündmus $\overline{B}$);

c) mõõteriista, mille viga oli (algebraliselt) väiksem kui $-\delta_1$ või suurem kui δ_1 (sündmus $\overline{A}$), tunnistame töökõlbmatuks (sündmus $\overline{B}$);

d) töökõlbmatu mõõteriista (sündmus $\overline{A}$) veaga väljaspool intervalli $(-\delta_1, \delta_1)$ tunnistame töövõimeliseks (sündmus B).

Kontrollimise tulemusena vastuvõetud otsustest on esimene ja kolmas õiged, teine ja neljas valed. Valed otsused on tingitud kontrollmõõteriista ebatäpsusest.

Nagu katsetatavate mõõteriistade viga, nii on ka kontrollmõõteriista viga juhuslik muutuja (antud ajamomendil muidugi). Vea kohta on meil teada tema keskmine väärtus, dispersioon, ruutkeskmine hälve või mõni teine karakteristik. Konkreetse katsetatava mõõteriista kontrollimisel konkreetse kontrollmõõteriistaga ei tea me sellepärast, kas tegime õige või vale otsuse, me võime rääkida ainult mingi otsuse tegemise tõenäosusest. Tähistame tõenäosuse, et me töövõimelise mõõteriista tunnistame töövõimeliseks, $P(AB)$; tõenäosuse, et me töövõimelise mõõteriista tunnistame töökõlbmatuks (fikseerime tõrke) — $P(A\overline{B})$. Töökõlbmatu mõõteriista töökõlbmatuks või töövõimeliseks tunnistamise tõenäosuse tähistame vastavalt $P(\overline{A}\overline{B})$ ja $P(\overline{A}B)$. Siis

$$P(AB) + P(A\overline{B}) + P(\overline{A}\overline{B}) + P(\overline{A}B) = 1, \qquad (3.4.1)$$

kuna ühe otsustest teeme me tingimata (ning loomulikult ei tee me kahte ega rohkem otsust korraga). Summa $P(AB) + P(A\overline{B}) = P(A)$ on samal ajal aeglase tõrke puudumise tõenäosus katsetataval mõõteriistal ja $P(\overline{A}\overline{B}) + P(\overline{A}B) = P(\overline{A})$ aeglase tõrke tõenäosus. Summa $P(A\overline{B}) + P(\overline{A}B)$ on vale otsuse tegemise tõenäosus.

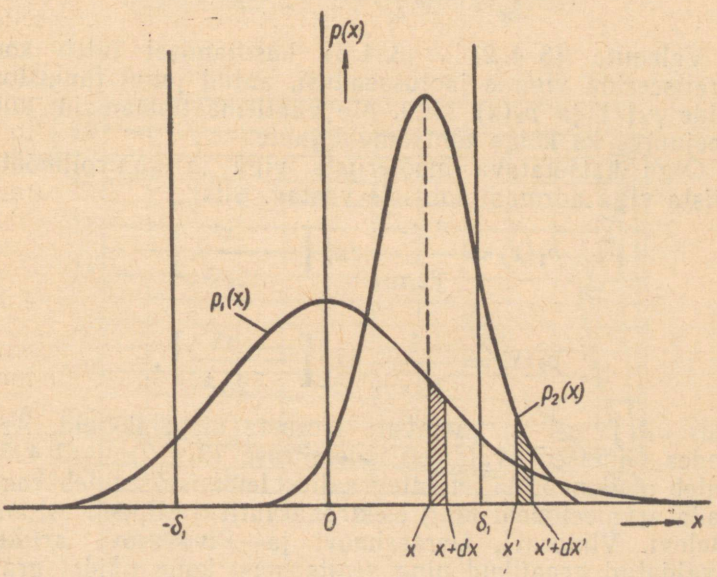
Meie ülesandeks on tõenäosuste $P(AB), P(A\overline{B}), P(\overline{A}\overline{B})$ ja $P(\overline{A}B)$ määramine sõltuvalt katsetatava ja kontrollmõõteriista viga iseloomustavatest karakteristikutest.

Olgu $p_1(x)$ katsetatava mõõteriista vea tõenäosustihedus (vt. joonis 3. 4. 1) ja $p_2(x)$ kontrollmõõteriista vea tõenäosustihedus. Lihtsuse mõttes loeme, et vigadel puudub süstemaatiline komponent.

Tõenäosus, et katsetatava mõõteriista viga asub vahemikus $(x, x + \mathrm{d}x)$, on $p_1(x)\,\mathrm{d}x$. Kuid kuna kontrollmõõteriist pole absoluutselt täpne, fikseeritakse kontrollmõõteriista näidu põhjal katsetatava mõõteriista veaks x'. Tõenäosus, et fikseeritakse viga vahemikus $(x', x' + \mathrm{d}x)$, kui viga tegelikult asub vahemikus $(x, x + \mathrm{d}x)$, on $p_1(x)\,p_2(x' - x)\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}x'$ (tõenäosuste korrutamise teoreemi põhjal). Tõenäosuse, et fikseeritakse (algebraliselt) suurem viga kui δ_1, tegelik viga on aga vahemikus $(x, x + \mathrm{d}x)$, leiame integraaliga

$$p_1(x)\left[\int_{\delta_1}^{\infty} p_2(x' - x)\,\mathrm{d}x'\right]\mathrm{d}x.$$

Tõenäosus, et fikseeritakse väärtusest δ_1 suurem viga, kui tegelik viga asub vahemikus $(-\delta_1, \delta_1)$, määratakse integraaliga



Joon. 3. 4. 1. Õigete ja ebaõigete otsuste tõenäosuse arvutamise juurde

$$\int_{-\delta_1}^{\delta_1} p_1(x)\left[\int_{\delta_1}^{\infty} p_2(x'-x)\,dx'\right]dx.$$

Arvestades veel $p_1(x)$ sümmeetriat $x=0$ suhtes, leiame siit, et

$$P(A\overline{B}) = 2\int_{-\delta_1}^{\delta_1} p_1(x)\left[\int_{\delta_1}^{\infty} p_2(x'-x)\,dx'\right]dx. \qquad (3.4.2)$$

Analoogiliste arutluste abil võime leida ka ülejäänud kolme otsuse tõenäosused. Nimelt

$$P(AB) = \int_{-\delta_1}^{\delta_1} p_1(x)\left[\int_{-\delta_1}^{\delta_1} p_2(x'-x)\,dx'\right]dx; \qquad (3.4.3)$$

$$P(\overline{A}B) = 2\int_{\delta_1}^{\infty} p_1(x)\left[\int_{-\delta_1}^{\delta_1} p_2(x'-x)\,dx'\right]dx; \qquad (3.4.4)$$

$$P(\overline{A}\overline{B}) = 2\int_{\delta_1}^{\infty} p_1(x)\left[\int_{\delta_1}^{\infty} p_2(x'-x)\,dx'\right]dx + \qquad (3.4.5)$$

$$+ 2\int_{-\infty}^{-\delta_1} p_1(x)\left[\int_{\delta_1}^{\infty} p_2(x'-x)\,dx'\right]dx.$$

Valemite (3.4.2) ... (3.4.5) kasutamisel tuleb konkretiseerida vigade jaotusseadusi, antud juhul funktsioonide $p_1(x)$ ja $p_2(x)$ kuju. Me vaatleme lihtsamaid, kuid seejuures ka kõige tähtsamaid juhte.

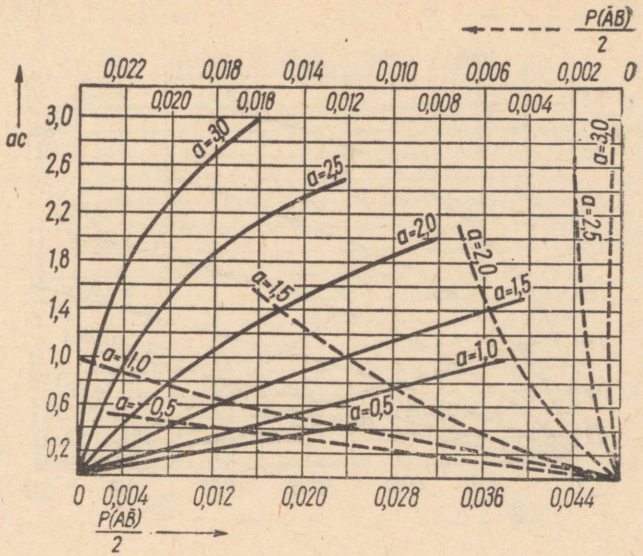
Olgu katsetatava mõõteriista viga ja kontrollmõõteriista viga normaaljaotusele vastav. Siis

$$p_1(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1}\exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma_1^2}\right]$$

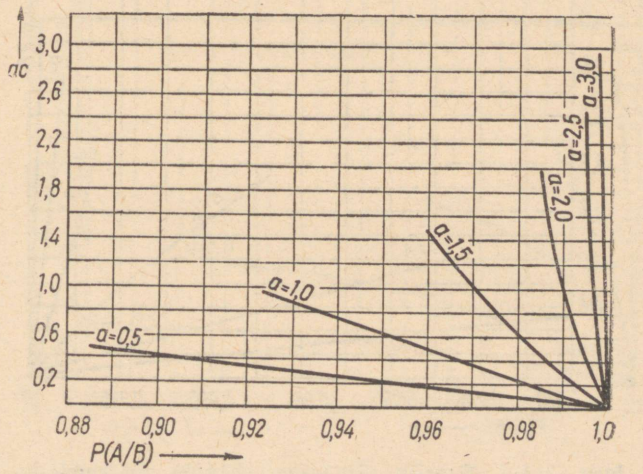
ja

$$p_2(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2}\exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma_2^2}\right],$$

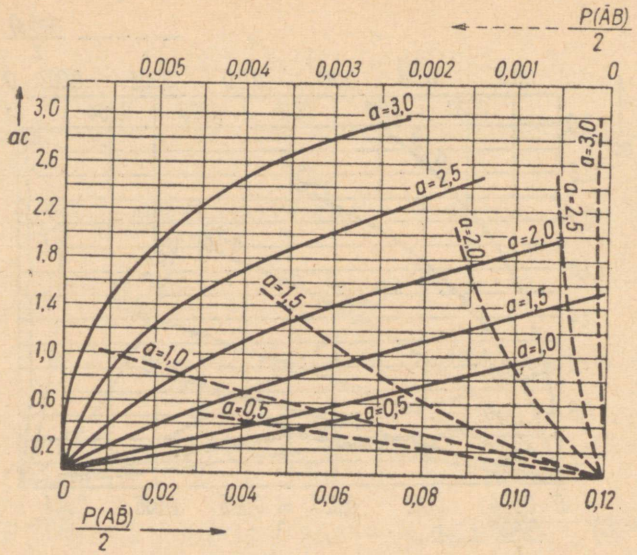
kus σ_1^2 ja σ_2^2 on vastavate jaotuste dispersioonid. Asetades viimased avaldised valemitesse (3.4.2) ... (3.4.5), tuleb meil nentida, et integraalide leidmiseks tuleb kasutada arvmeetodeid ning elektronarvutit. Allpool esitame Belovi, Viktorovi, Gerassimovi ja Pivovarovi artiklis avaldatud graafikud ning sealtsamast kolm näidet graafikute kasutamise kohta, muutes vaid mõningaid tähistusi.



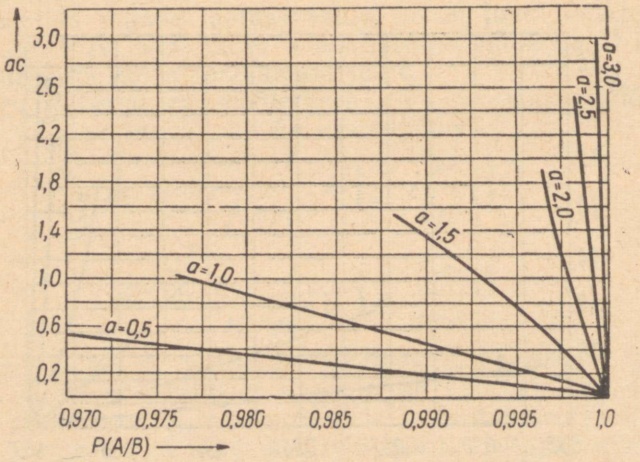
Joon. 3. 4. 2. Graafik tõenäosuste $P(\bar{A}B)$ ja $P(A\bar{B})$ määramiseks, kui $b = 0$ (normaaljaotus)



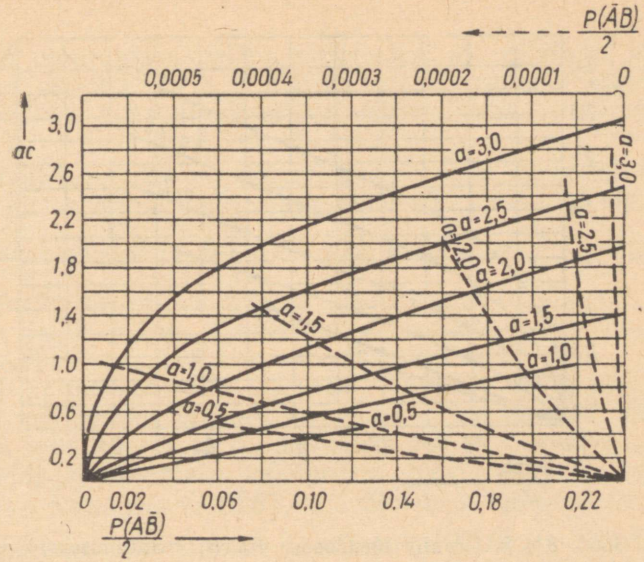
Joon. 3. 4. 3. Graafik tõenäosuse $P(A/B)$ määramiseks, kui $b = 0$ (normaaljaotus)



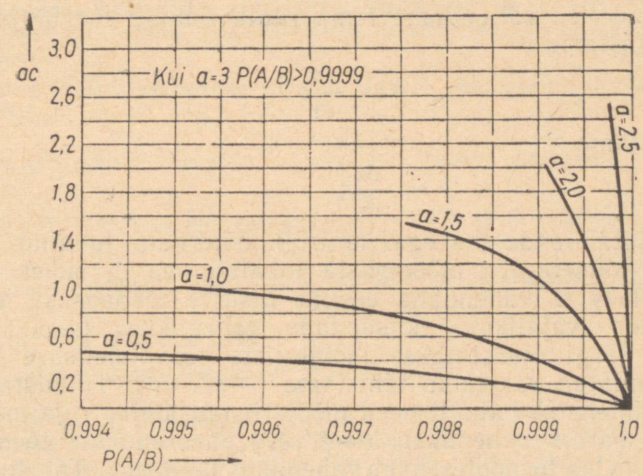
Joon. 3. 4. 4. Graafik tõenäosuste $P(\bar{A}B)$ ja $P(A\bar{B})$ määramiseks, kui $b = \frac{1}{3}$ (normaaljaotus)



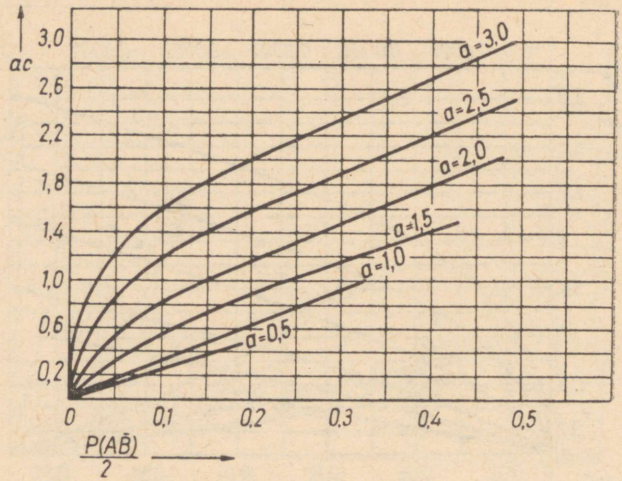
Joon. 3. 4. 5. Graafik tõenäosuse $P(A/B)$ määramiseks, kui $b = \frac{1}{3}$ (normaaljaotus)



Joon. 3. 4. 6. Graafik tõenäosuste $P(\bar{A}B)$ ja $P(A\bar{B})$ määramiseks, kui $b = \frac{2}{3}$ (normaaljaotus)



Joon. 3. 4. 7. Graafik tõenäosuse $P(A/B)$ määramiseks, kui $b = \frac{2}{3}$ (normaaljaotus)



Joon. 3. 4. 8. Graafik tõenäosuse $P(A\bar{B})$ määramiseks, kui $b = 1$ (normaaljaotus)

Tähistame kontrollmõõteriista kolmekordse ruutkeskmise vea tähisega δ_2; siis on $\delta_2 = 3\sigma_2$. Katsetatava mõõteriista lubatud vea väljendame tema ruutkeskmise vea ühikutes ja tähistame

$$a = \frac{\delta_1}{\sigma_1}.$$

Tähistame

$$c = \frac{\delta_2}{\delta_1};$$

c kujutab endast seega kontrollmõõteriista lubatud vea δ_2 ja katsetatava mõõteriista lubatud vea δ_1 suhet.

Selleks et vähendada ekslike otsuste tõenäosust, võib osutuda vajalikuks kitsendada vahemikku $(-\delta_1, \delta_1)$, mille järgi otsustatakse mõõteriista töövõimelisuse üle. Kitsendatud vahemiku tähistame $(-\delta_1', \delta_1')$. Tunnistades töövõimelisteks ainult need mõõteriistad, mille viga mõõtmisel sattus vahemikku $(-\delta_1', \delta_1')$, suurendame tõenäosust, et viga tõepoolest asub vahemikus $(-\delta_1, \delta_1)$. Tähistame vahe $\delta_1 - \delta_1'$ tähega d ning väljendame d kontrollmõõteriista lubatud vea δ_2 kaudu:

$$d = b\delta_2 = 3b\sigma_2,$$

kus b muutub vahemikus $(0, 1)$. Kui me esialgset vahemikku ei kitsenda, siis $b = 0$. Kui kitsendame esialgset vahemikku kontrollmõõteriista lubatud vea δ_2 võrra, siis $b = 1$.

Graafikute abil on võimalik lahendada järgmisi ülesandeid: on antud katsetatava mõõteriista lubatud viga δ_1, ruutkeskmine viga σ_1 (kust võib leida $a = \frac{\delta_1}{\sigma_1}$), tegur b ja üks tõenäosustest $P(\bar{A}B)$, $P(A\bar{B})$ ja $P(A/B)$; on vaja leida tegur c, mis omakorda võimaldab leida kontrollmõõteriista lubatud vea valemist $\delta_2 = c\delta_1$;

on antud kontrollmõõteriista lubatud vea ja katsetatava mõõteriista lubatud vea suhe c, katsetatava mõõteriista lubatud vea ja ruutkeskmise vea suhe a ning tegur b; leida töökõlbmatu mõõteriista töövõimeliseks tunnistamise tõenäosus $P(\bar{A}B)$, töövõimelise mõõteriista töökõlbmatuks tunnistamise tõenäosus $P(A\bar{B})$ ja tõenäosus $P(A/B)$, et mõõteriist on tõepoolest töövõimeline, kui me ta kontrollimisel töövõimeliseks tunnistame.

Näide 3. 4. 1. Antud on katsetatava mõõteriista maksimaalselt lubatud vea ja ruutkeskmise vea suhe $a = 2{,}0$; tõenäosus, et me töökõlbmatu mõõteriista tunnistame töövõimeliseks, $P(\bar{A}B) = 0{,}002$; maksimaalselt lubatud viga δ_1; $b = 0$ (vahemikku $(-\delta_1, \delta_1)$ ei kitsendata).

Leida kontrollmõõteriista lubatud viga δ_2, tõenäosused $P(A\bar{B})$ ja $P(A/B)$.

Lahendus. Arvutame $\frac{P(\bar{A}B)}{2} = 0{,}001$. Graafikult 3. 4. 2 leiame, et $ac = 0{,}15$. Siit siis $c = \frac{0{,}15}{2{,}0} = 0{,}075$ ja $\delta_2 = 0{,}075\,\delta_1$.

Samalt graafikult leiame, et $ac = 0{,}15$ ja $a = 2{,}0$ jaoks $\frac{P(A\bar{B})}{2} =$ $= 0{,}001$, kust $P(A\bar{B}) = 0{,}002$.

Graafikult 3. 4. 3 leiame, et $P(A/B) = 0{,}997$.

Näide 3. 4. 2. Oletame, et näite 3. 4. 1 tingimustel ei ole võimalik rahuldada nõuet $c = 0{,}075$, teiste sõnadega, ei ole võimalik kasutada niivõrd täpset kontrollmõõteriista. On tarvis valida tehniliselt täidetav c väärtus.

Lahendus. Kitsendame vahemikku $(-\delta_1, \delta_1)$ vahemikuni $(-\delta'_1, \delta'_1)$, teiste sõnadega, loeme töövõimeliseks ainult need mõõteriistad, mille viga asub kitsamas vahemikus $(-\delta'_1, \delta'_1)$. Valime

$b = \frac{1}{3}$ ning kasutame graafikut 3.4.4, kust leiame, et $a = 2{,}0$ ja $\frac{P(\bar{A}B)}{2} = 0{,}001$ jaoks $ac = 0{,}9$ ja edasi $c = 0{,}45$ ning $\delta_2 = 0{,}45\,\delta_1$.

Arvutame kitsama vahemiku:

$$\delta_1 - \delta'_1 = d;$$
$$\delta'_1 = \delta_1 - d = \delta_1 - b\delta_2 =$$
$$= \delta_1 - \frac{1}{3} \cdot 0{,}45 \cdot \delta_1 = 0{,}85\ \delta_1.$$

Graafikult 3.4.4 leiame, et $ac = 0{,}9$ ja $a = 2{,}0$ jaoks $\frac{P(A\bar{B})}{2} =$ $= 0{,}028$ ning $P(A\bar{B}) = 0{,}056$. Graafikult 3.4.5 leiame, et $P(A/B) =$ $= 0{,}998$.

Näide 3.4.3. Antud: $a = 3{,}0$; $c = 0{,}5$; $d = \sigma_2$.

Leida $P(\bar{A}B)$, $P(A\bar{B})$ ja $P(A/B)$.

Lahendus. $ac = 1{,}5$; $d = b\delta_2 = b \cdot 3\sigma_2 = \sigma_2$, kust $b = \frac{1}{3}$.

Graafikult 3.4.4 leiame, et $\frac{P(\bar{A}B)}{2} = 0{,}0001$, $P(\bar{A}B) = 0{,}0002$; $\frac{P(A\bar{B})}{2} = 0{,}012$, $P(A\bar{B}) = 0{,}024$. Graafikult 3.4.5 leiame, et $P(A/B) >$ $> 0{,}999$.

Juhime veel lõpuks tähelepanu sellele, et kui $b = 1$, s.t. $d = \delta_2$, siis on $P(\bar{A}B) \approx 0$ ja $P(A/B) \approx 1$.

Eespool vaadeldi erijuhtu, kui nii katsetatava kui ka kontrollmõõteriista viga oli jaotunud normaalselt. Kuid praktikas juhtub, et kontrollmõõteriista vea jaotus ei ole teada, küll on aga teada, et viga ei ületa teatud maksimaalset väärtust, täpsemini, tõenäosus, et viga on absoluutväärtuselt suurem teatud väärtusest δ_2, on niivõrd väike, et me võime lugeda kontrollmõõteriista vea jaotunuks vahemikus $(-\delta_2, \delta_2)$. Mitte teades kontrollmõõteriista vea jaotust vahemikus $(-\delta_2, \delta_2)$, valime teatud mõttes «halvima» juhu ning loeme jaotuse ühtlaseks. Niimoodi toimides sooritame muidugi ebatäpsuse, kuid see-eest võime olla veendunud, et ennem hindame üle, kui alahindame ekslike otsuste tõenäosust.

Olgu

$$p_1(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma} \exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right]$$

ja kontrollmõõteriista vea tõenäosustihedus (vt. joonist 3.4.9).

$$p_2(x)=\begin{cases}0, \text{ kui } x<-\sigma_2;\\ \dfrac{1}{2\delta_2}, \text{ kui } -\delta_2<x<\delta_2;\\ 0, \text{ kui } \delta_2<x.\end{cases}$$

Asetades need funktsioonid valemitesse (3.4.2) ... (3.4.5), leiame:

$$P(A\bar{B})=\frac{1}{\delta'_2}[f(\delta'_1-\delta'_2)-f(\delta'_1)]-$$

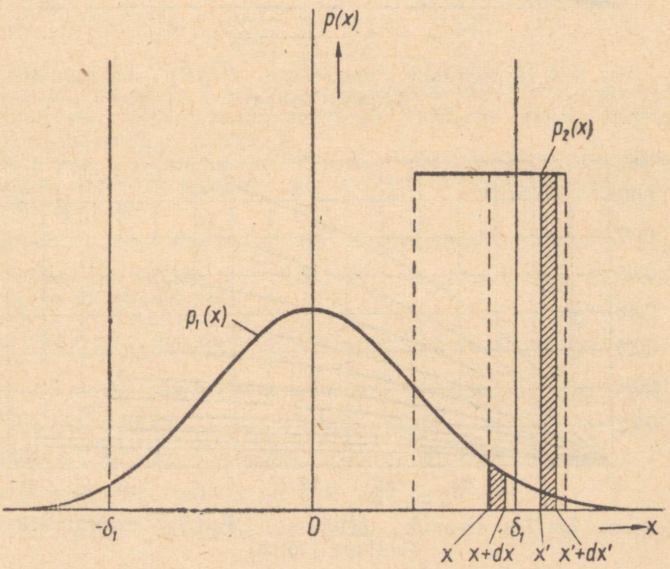
$$-\frac{\delta'_1-\delta'_2}{\delta'_2}[\Phi(\delta'_1)-\Phi(\delta'_1-\delta'_2)]; \qquad (3.4.6)$$

$$P(AB)=-\frac{1}{\delta'_2}[f(\delta'_1-\delta'_2)-f(\delta'_1)]+$$

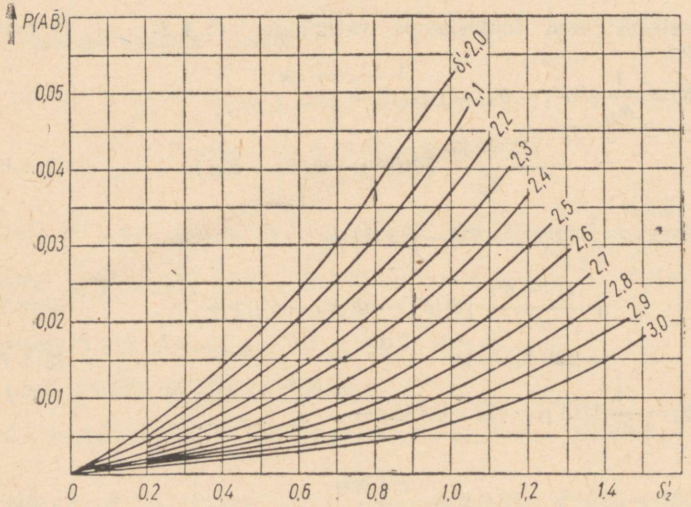
$$+\frac{\delta'_1-\delta'_2}{\delta'_2}[\Phi(\delta'_1)-\Phi(\delta'_1-\delta'_2)]+$$

$$+2\Phi(\delta'_1)-1; \qquad (3.4.7)$$

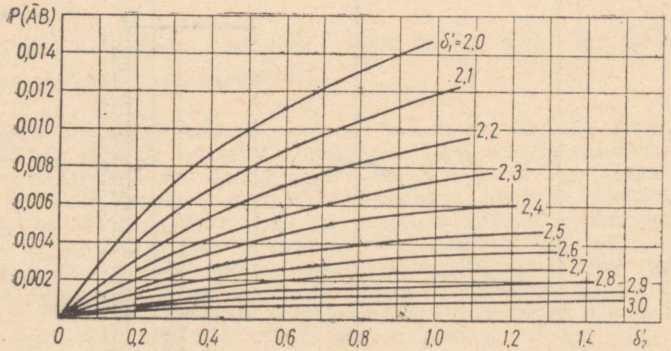
$$P(\bar{A}B)=\frac{1}{\delta'_2}[f(\delta'_1)-f(\delta'_1+\delta'_2)]-$$



Joon. 3.4.9. Õigete ja ebaõigete otsuste tõenäosuse arvutamine; katsetatava mõõteriista viga on jaotunud normaalselt, kontrollmõõteriista viga ühtlaselt



Joon. 3. 4. 10. Graafik tõenäosuse $P(A\bar{B})$ määramiseks (ühtlane jaotus)



Joon. 3. 4. 11. Graafik tõenäosuse $P(\bar{A}B)$ määramiseks (ühtlane jaotus)

$$\div \frac{\delta'_1+\delta'_2}{\delta'_2}[\Phi(\delta'_1+\delta'_2)-\Phi(\delta'_1)]; \tag{3.4.8}$$

$$P(\bar{A}\bar{B})=-\frac{1}{\delta'_2}[f(\delta'_1)-f(\delta'_1+\delta'_2)]+$$

$$+\frac{\delta'_1+\delta'_2}{\delta'_2}[\Phi(\delta'_1+\delta'_2)-\Phi(\delta'_1)]-$$

$$-2\Phi(\delta'_1)+2. \tag{3.4.9}$$

Siinjuures on δ_1 katsetatava mõõteriista lubatud viga ning

$$\delta'_1=\frac{\delta_1}{\sigma}$$

ja

$$\delta'_2=\frac{\delta_2}{\sigma},$$

$f(x)$ on normeeritud normaaljaotuse tõenäosustihedus

$$f(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{x^2}{2}\right]$$

ja $\Phi(x)$ vigade ehk Laplace'i integraal (vt. lisa II)

$$\Phi(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{x}\exp\left[-\frac{u^2}{2}\right]du.$$

Joonistel 3.4.10 ja 3.4.11 on toodud vastavalt $P(A\bar{B})$ ja $P(\bar{A}B)$ graafikud sõltuvalt δ'_2-st erinevate δ'_1 väärtuste jaoks. Selgitame graafikute kasutamist näidetega.

Näide 3.4.4. Antud on katsetatavate mõõteriistade vea ruutkeskmine hälve $\sigma=1\%$, lubatud viga $\delta_1=3\%$, kontrollmõõteriista lubatud viga $\delta_2=1\%$.

Leida tõenäosus $P(A\bar{B})$, et me töövõimelises mõõteriistas fikseerime tõrke, ja tõenäosus $P(\bar{A}B)$, et me töökõlbmatu mõõteriista tunnistame töövõimeliseks.

Lahendus. Arvutame $\delta'_1=\frac{\delta_1}{\sigma}=\frac{3}{1}=3$, $\delta'_2=\frac{\delta_2}{\sigma}=\frac{1}{1}=1$. Nende δ'_1 ja δ'_2 väärtuste jaoks leiame graafikult 3.4.10 $P(A\bar{B})=0{,}0065$ ja graafikult 3.4.11 $P(\bar{A}B)=0{,}0009$.

Näide 3.4.5. Antud $\delta_1=2\%$, $\sigma=1\%$, $P(\bar{A}B)=0{,}01$.

Leida kontrollmõõteriista lubatud viga δ_2 ja $P(A\bar{B})$.

Lahendus. Arvutame $\delta'_1=\frac{\delta'}{\sigma}=\frac{2}{1}=2$. Graafikult 3.4.11 leiame, et kui $P(\bar{A}B)=0{,}01$ ja $\delta'_1=2$, siis $\delta'_2=0{,}5$ ja $\delta_2=\delta'_2\sigma=0{,}5\cdot 1=0{,}5\%$. Kui $\delta'_1=2$ ja $\delta'_2=0{,}5$, siis graafikult 3.4.10 leiame, et $P(A\bar{B})=0{,}019$.

4.

Töökindluskatsed

4.1. Katsete eesmärk ja metoodika

Vaatleme nüüd, kuidas määrata toote töökindlusparameetreid eksperimentaalselt.

Ei ole raske mõista, et töökindlusparameetrite määramine eksperimentaalselt osutub teatud tingimustel mõõdapääsmatuks ja isegi ainuvõimalikuks. Nagu teame, iseloomustatakse raadiodetailide tõrketust nende tõrkeintensiivsuse λ abil. Ei ole meetodit, mis võimaldaks arvutada detaili tõrkeintensiivsuse väärtust, teades tema konstruktsiooni ja valmistamiseks kasutatud materjalide füüsikalisi ja keemilisi omadusi. Ainukeseks väljapääsuks on järelikult tõrkeintensiivsuse katseline määramine. Ka detaili tõrkeintensiivsuse arvutamine teatud koormuse ja ümbritseva õhu temperatuuri väärtuste jaoks saab võimalikuks alles siis, kui oleme katseliselt määranud tõrkeintensiivsuse väärtuse nimikoormusel ja standardse temperatuuri (+20° C) juures ning veel vähemalt kahe erineva koormuse ja temperatuuri kombinatsiooni puhul (vt. valem [2. 3. 3]).

Põhimõtteliselt võiksime läbi saada ilma aparatuuri töökindluskatseteta, kuna teades detailide tõrketusparameetreid (ja vananemist iseloomustavaid suurusi), on võimalik arvutada aparatuuri tõrketusparameetrid esimeses ja kolmandas peatükis toodud meetoditel või mingeid täpsemaid ja keerukamaid meetodeid kasutades. Kuid ei tohi unustada, et ka täpsemad meetodid jäävad ligilähedasteks meetoditeks, kus matemaatilised raskused, aga veel sagedamini arvutusteks vajalike algandmete puudumine ei võimalda arvestada kõiki töökindlust määravaid tegureid. Pole näiteks teada meetodit, mis võimaldaks

arvestada aparatuuri mehaanilise konstruktsiooni iseärasusi. Võime viidata ka hästi teadaolevaile faktidele, et kui kaks tehast toodavad üht ja sedasama tüüpi aparatuuri, siis reeglina nende toodang erineb töökindluselt. Siin me täheldame tehnoloogia ja tehnoloogilise distsipliini mõju toodangu töökindlusele, mis samuti ei kajastu arvutustes. Need on põhjused, mis sunnivad meid läbi viima ka aparatuuri (näiteks raadiovastuvõtjate, raadiomõõteriistade jne.) töökindluskatseid keskmise tõrgetevahelise tööaja ja teiste töökindlusparameetrite määramiseks.

Kuid töökindluskatsete eesmärk ei piirdu ainult sellega. Pole raske märgata, et detailide ja aparatuuri töökindlus (esmajärjekorras muidugi tõrketus-) parameetrite katselisel määramisel on nii-öelda passiivne iseloom: fikseerida seda, mis juba olemas on, määrata juba olemasolevate detailide või aparatuuri seni veel teadmata töökindlusparameetrite väärtus. Kuid kogemused näitavad, et raadiodetailide ja aparatuuri tegelik töökindlus jääb maha neile esitatud nõudmistest. Seoses sellega kerkib esiplaanile töökindluskatsete aktiivne külg, mis seisneb detaili või aparatuuri konstruktsiooniliste ja tehnoloogiliste puuduste väljaselgitamises ja nende puuduste kõrvaldamises, teiste sõnadega, tõrketuse, töökindluse ja kvaliteedi tõstmises. Töökindluskatseid tehakse nii konstrueerimisbüroodes kui ka tehastes. Detailide, sõlmede ja kogu aparatuuri töökindluskatseid konstrueerimisbüroodes tuleb vaadelda kui konstrueerimisprotsessi üht osa ning katsete aktiivne iseloom on siin hästi näha. Töökindluskatsed on pikaajalised katsed. On hästi teada, et paljud konstruktsioonilised ja tehnoloogilised puudused ilmnevad alles aparatuuri pikaajalisel töötamisel ning nende avastamine arendustööde käigus, kui ei ole ette nähtud töökindluskatseid, on praktiliselt võimatu. Uue aparatuuri juurutamisel tootmisesse nähakse ette aparatuuri töökindluskatsed prooviseeriana valmistatud toodangule. Siin peab katsete aktiivne osa avalduma just tehnoloogia täiustamises katsete tulemuste põhjal. Edaspidi on töökindluskatsed ette nähtud perioodiliselt 1...5 aasta tagant. Peamiseks eesmärgiks jääb siin toodete töökindlusparameetrite vastavuse kontrollimine kord juba kindlaksmääratud ja tehnilises dokumentatsioonis kirjapandud väärtustele.

Vaatleme, kuidas toimuvad töökindluskatsed.

Alustame mittetaastatavatest toodetest. Siia kuuluks enamik raadiodetaile ja osa aparatuuri liike. Kui meid huvitab taastatavate toodete käitumine kasutamise algusest kuni esimese tõrke tekkimiseni, võib ka neid vaadelda analoogilise skeemi järgi. Olgu meil katseteks seatud N_0 toodet. Olgu katsetamistingimused kindlaks määratud, kusjuures see ei tähenda mitte ainult rakendatud pinge, detaili läbiva voolu, eralduva võimsuse väärtuste fikseerimist, vaid ka ümbritseva õhu temperatuuri, õhuniiskuse, mehaanilise vibratsiooni ja muude tõrketust mõjutavate tegurite konstantsete väärtuste kindlustamist. Näiteks võivad katsed toimuda niiskusekambris automaatselt reguleeritava temperatuuri ja õhuniiskuse juures. Kui me edaspidi räägime «katsetamise kestusest», siis mõistame selle all «puhast» katsetamise aega. Me ei arvesta näiteks aega, mille vältel katsetatavad tooted on ööseks välja lülitatud jms.

Ettekujutuse saamiseks katsete kalendaarsest kestusest tuletame meelde, et ühevahetuselise töö korral on katse maksimaalne kestus ühes kuus umbes 180 tundi, ühes kvartalis veidi rohkem kui 500 tundi.

Tõrke tekkimisel ühes N_0 tootest võime toimida kahte moodi: me võime töökõlbmatuks muutunud toote asendada samasuguse töövõimelise uue tootega (siis on katsetatavate toodete arv konstantne), aga me võime seda ka mitte teha (siis väheneb katsetatavate toodete arv monotoonselt). Oletame, et toodete asendamist ei toimu. Alati pole võimalik fikseerida tõrke tekkimise täpset momenti. Kui katsetatavad detailid või aparatuur on pideva järelevalve all ja tõrge avaldub lihtsalt (takisti värvi muutumine läbipõlemisel, katsetatava mõõteriista näidu tunduv muutumine), ei ole muidugi mingeid raskusi. Kui aga tõrge seisneb näiteks katsetatava võimenduslambi tõusu väljumises lubatud piiridest vananemise tagajärjel, avastatakse selline tõrge alles lambi töövõime kontrollimisel, mis toimub teatud perioodilisusega. Maksimaalne viga tõrkemomendi määramisel on seega võrdne kontrollimisperioodi pikkusega. Mõnikord võib pidev järelevalve osutuda majanduslikult põhjendamatuks ja toodete töövõimet kontrollitakse ainult üks kord teatud ajavahemiku jooksul, kusjuures määratakse ainult töökõlbmatute toodete arv, tõrgete tekkimise

momendid on aga teadmata. Me vaatleme nii varianti, kus tõrke tekkimise momendid on teada, kui ka varianti, kus tõrke tekkimise momenti ei fikseerita.

Niisiis, katsetatakse N_0 mittetaastatavat toodet, töökõlbmatuks muutunud toodete asendamist töövõimelistega ei toimu. Vaatame, kuidas arvutatakse katse tulemuste põhjal tõrketusparameetrid.

Selleks kasutame valemeid paragrahvist 1. 1, asendades vastavates valemites diferentsiaalid (lõpmatult väikesed muutused) lõplike (kuid siiski küllalt väikeste) muutustega. Jaotame kogu katse kestuse võrdseteks ajavahemikeks Δt. Olgu t_i i-nda vahemiku keskpunkt. Siis $t_i = (i - \frac{1}{2})\Delta t$. i-ndas vahemikus töökõlbmatuks muutunud toodete arvu tähistame n_i. Tõrkesageduse (vt. valem (1. 1. 5)) leiame siis valemist

$$f(t_i) = \frac{n_i}{N_0 \Delta t}. \qquad (4.1.1)$$

Tõrkesagedus on samal ajal tõrketu tööaja tõenäosustihedus, teisiti öeldes, tõrke tekkimise momentide tõenäosustihedus. Tõrke tõenäosuse (tõrketu tööaja jaotusfunktsiooni) leiame valemist

$$q(t_i) = F(t_i) = \frac{1}{N_0} \sum_{j=1}^{i} n_j. \qquad (4.1.2)$$

Summa $\sum_{j=1}^{i} n_j$ kujutab endast tõrgete arvu vahemikkudes numbriga 1-st kuni i-ni. Kuna tõrke tõenäosus $q(t)$ ja tõrketu töö tõenäosus $p(t)$ on vastandsündmused, siis

$$p(t_i) = 1 - \frac{1}{N_0} \sum_{j=1}^{i} n_j = \frac{N_0 - \sum_{j=1}^{i} n_j}{N_0} \qquad (4.1.3)$$

(vt. ka valemit (1. 1. 3)).

Valemist (1. 1. 7) nähtub, et tõrkeintensiivsuse katselisel määramisel peame kasutama valemit

$$\lambda(t_i) = \frac{n_i}{N_i \Delta t}, \qquad (4.1.4)$$

kus $N_i = N_0 - \sum_{j=1}^{i-1} n_j$ on töövõimeliste toodete arv i-nda ajavahemiku alguseks.

Valemite (4. 1. 1)...(4. 1. 4) kasutamisel ei ole nõutav,

et toote tõrketu tööaeg oleks täpselt teada, piisab sellest, kui me teame, mitmendas ajavahemikus Δt tõrge tekkis. Ka ei teinud me mingeid kitsendusi toodete tõrketu tööaja jaotuse kohta.

Oletame nüüd, et tõrketu tööaeg on jaotunud eksponentsiaalselt. Nagu teame, on see praktiliselt tähtis ja matemaatiliselt lihtne erijuht. Tutvume mõningate enamkasutatavate katse organiseerimise skeemidega. Edaspidi tähistame katse kestuse t'-ga. Katse tulemuste põhjal leitud tõrketusparameetrite väärtusi tähistame «katusega» vastava tähise kohal.

a. Tekkigu esimene tõrge pärast t_1 ajaühiku (tunni) möödumist katse algusest, teine tõrge pärast t_2 ühiku möödumist jne. Töökõlbmatuks muutunud toodete asendamist ei toimu. Oletame, et katse kestab m-nda tõrkeni, nii et ainult m toodet muutub töökõlbmatuks ($m < N_0$). Selline situatsioon tekib siis, kui on tegemist suure keskmise tõrketu tööajaga toodetega (näiteks enamiku raadiodetailidega). Järelikult $N_0 - m$ toodet töötasid tõrketult t_m ajaühikut ning katset jätkates oleksid nad töötanud veel teatud aeg. N_0 toote summaarne tõrketu tööaeg määratakse siis valemiga

$$T = t_1 + t_2 + \ldots + t_m + (N_0 - m)\,t_m.$$

Saab näidata (kasutades selleks «maksimaalse tõepärasuse printsiipi»), et keskmine tõrketu tööaeg

$$\hat{t}_k = \frac{t_1 + t_2 + \ldots + t_m + (N_0 - m)\,t_m}{m}. \qquad (4.1.5)$$

Kui katse lõpetatakse mitte m-nda tõrke tekkimise momendil, vaid hiljem (aga enne $m+1$ tõrke tekkimist), nii et $N_0 - m$ toodet töötavad t' tundi, võib ka siin kasutada valemit (4.1.5), kirjutades viimase liikme kujul $(N_0 - m)\,t'$.

Praktikas kasutatakse mõnikord ekslikult valemeid

$$\frac{t_1 + t_2 + \ldots + t_m}{m}$$

või

$$\frac{t_1 + t_2 + \ldots + t_m + (N_0 - m)\,t_m}{N_0}$$

Kasutades esimest valemit, ei arvesta me seda, et $N_0 - m$ toodet töötasid tõrketult ajavahemiku t_m vältel

ja oleksid veelgi töötanud. Teises valemis jagame summaarse tõrketu tööaja toodete arvuga N_0, kuigi tõrkeid toimus ainult m. Mõlemal juhul saame tegelikust väiksema keskmise tõrketu tööaja väärtuse.

Leides katsete tulemuste põhjal keskmise tõrketu tööaja ning teades, et tööaeg on jaotunud eksponentsiaalselt, ei ole raske leida tõrkeintensiivsust ja tõrketu töö tõenäosust.

b. Katse on organiseeritud nagu ennegi, kuid kestab kuni kõigi N_0 toote töökõlbmatuks muutumiseni. Valemi (4.1.5) asemele tuleb siis valem

$$\hat{t}_k = \frac{t_1 + t_2 + \ldots + t_{N_0}}{N_0}. \qquad (4.1.6)$$

c. Katsetatakse N_0 toodet t' tunni jooksul. Tõrke tekkimise momente ei fikseerita. Pärast t' tunni möödumist leitakse töökõlbmatute toodete arv m.

Katse tulemuste põhjal määratakse tõrke tõenäosus $\hat{q}$ pärast aja t' möödumist valemiga

$$\hat{q} = \frac{m}{N_0}. \qquad (4.1.7)$$

Kuna

$$q = 1 - p = 1 - \exp[-\lambda t'] = 1 - \exp\left[-\frac{t'}{t_k}\right],$$

siis

$$\frac{m}{N_0} = 1 - \exp\left[-\frac{t'}{\hat{t}_k}\right]$$

ja

$$\hat{t}_k = \frac{t'}{\ln N_0 - \ln(N_0 - m)}. \qquad (4.1.8)$$

Oletame nüüd, et tõrketusparameetrite määramiseks katsetatakse N_0 mittetaastatavat toodet, kusjuures tõrke tekkimisel mingis tootes asendatakse töökõlbmatuks muutunud toode uuega, nii et katsetatavate toodete arv on konstantne. Kasutades töökõlbmatute toodete asendamist, saame ettemääratud kestuse juures rohkem informatsiooni toodete tõrketuse kohta kui katsetamisel ilma toodete asendamiseta. Tõrke tekkimise momendid fikseeritakse. Eelneva toote tõrke tekkimise moment on samal ajal järgneva (eelmist toodet asendava) toote töötamise

algmomendiks. Näeme, et on tegemist N_0 toote tõrkevooga. Nagu teada (vt. paragrahv 1.4), võib tõrkevoo iseloomustamiseks kasutada tõrkevoo parameetri mõistet. Tõrkevoo definitsiooni järgi kujutab see endast tõrgete keskmist arvu ajaühikus vaadeldaval ajamomendil. Kui silmas pidada asjaolu, et toodetel esineb enam või vähem teravalt väljendunud sissetöötamisperiood, peame lugema tõrkevoo vähemalt alguses mittestatsionaarseks, teiste sõnadega, tõrkevoo parameeter sõltub ajast.

Tähistame nende toodete tõrkevoo parameetri $\Lambda^*(t)$. Kuid katsete eesmärgiks on mitte N_0 toote, vaid ühe toote tõrkevoo parameetri $\lambda^*(t)$ leidmine. Kuna meil on tegemist ühesuguste katsetatavate toodetega, mille tõrkevood liituvad, siis

$$\Lambda^*(t) = N_0\lambda^*(t) \qquad (4.1.9)$$

ja

$$\lambda^*(t) = \frac{\Lambda^*(t)}{N_0}. \qquad (4.1.10)$$

Vaatame, kas meie arutlustes muutub midagi, kui katsetatakse N_0 taastatavat toodet (raadiomõõteriista, televiisorit, raadiovastuvõtjat). Tõrke tekkimisel toodet uuega ei asendata, vaid ta remonditakse ja seatakse uuesti üles katse jätkamiseks. Tõrketusparameetrite määramisel remondiks kulunud aega ei arvestata, küll aga saab siit määrata näiteks keskmist remondikestust ja teisi remonditavust iseloomustavaid parameetreid. Ka siin moodustavad üksikute toodete tõrkevood parameetriga $\lambda^*(t)$ liitudes summaarse tõrkevoo parameetriga $\Lambda^*(t)$ ja formaalselt saame jällegi seosed (4.1.9) ja (4.1.10). Sellepärast võime vaadelda koos mittetaastatavate ja taastatavate toodete katsetamist.

Jaotame katse kestuse võrdseteks vahemikeks Δt; t_i on i-nda vahemiku keskpunkt. n_i-ga tähistame i-ndas vahemikus töökõlbmatuks muutunud toodete arvu (tõrgete arvu), mis on samal ajal katsetamiseks ülesseatud uute toodete arv. Keskmine tõrgete arv i-ndas vahemikus (tõrkevoo parameeter) on niisiis

$$\hat{\Lambda}^*(t_i) = \frac{n_i}{\Delta t}$$

ja ühe toote tõrkevoo parameeter valemi (4. 1. 10) järgi

$$\hat{\lambda}^*(t_i) = \frac{n_i}{N_0 \Delta t}. \qquad (4.1.11)$$

Nagu teame, on paljudel raadiodetailidel tõrkeintensiivsus normaalse töö perioodil konstantne ($\lambda(t) = \lambda$). Edasi teame (vt. paragrahv 1. 4), et tõrkevoo parameeter on sel juhul samuti konstantne $\lambda^*(t) = \lambda^*$ ja langeb väärtuselt kokku tõrkeintensiivsuse väärtusega, s. t. $\lambda^* = \lambda$. Samas paragrahvis nägime, et ka taastatava toote tõrkevoo parameeter jääb pärast sissetöötamisperioodi lõppemist konstantseks, kusjuures tema pöördväärtus annab keskmise tõrgetevahelise tööaja. Peatume sellel tähtsal erijuhul lähemalt ning vaatleme veel kahte katse organiseerimise varianti.

d. Katsetatakse N_0 toodet, kusjuures katse kestus t' on ette kindlaks määratud. Töökõlbmatuks muutunud tooted asendatakse (kui on tegemist mittetaastatavate toodetega) või remonditakse (kui on tegemist taastatavate toodetega). Katsete käigus määratakse tõrgete koguarv n; n on seejuures juhuslik suurus.

Võime kirjutada, et

$$\hat{\lambda} = \frac{n}{N_0 t'} \qquad (4.1.12)$$

ja

$$\hat{t}_k = \frac{1}{\hat{\lambda}} = \frac{N_0 t'}{n}, \qquad (4.1.13)$$

kus $\hat{t}_k$ on keskmine tõrgetevaheline tööaeg.

e. Käesolev variant erineb variandist d ainult selle poolest, et ette on kindlaks määratud mitte katse kestus, vaid tõrgete arv n. Katse lõpetatakse kohe pärast n-nda tõrke tekkimist. Katse kestus t' on niisiis juhuslik suurus.

Valem keskmise tõrketu tööaja ja tõrkeintensiivsuse määramiseks ei erine kujult valemitest (4. 1. 12) ja (4. 1. 13).

Toodete töökindluskatse planeerimisel ja katsetulemuste interpreteerimisel tekib terve rida matemaatilisi probleeme. Mõnel neist peatume järgmises paragrahvis. Kuid siin käsitleme üksikuid elektronmõõteriistade, raadiovastuvõtjate jms. töökindluskatsete organiseerimisel tekkivaid küsimusi.

Kuidas imiteerida tegelikke kasutamisolusid laboratooriumis tehtavatel töökindluskatsetel? Näilisele lihtsusele vaatamata kutsub vastuse leidmine esile raskusi.

Tegelikkusele vastavate andmete saamiseks laboratooriumis peavad katsetamisolud võimalikult täpselt imiteerima kasutamisolusid. Aparatuuri tehnilistes tingimustes on kindlaks määratud temperatuurivahemik, milles ta peab töötama, maksimaalselt lubatud suhteline õhuniiskus, võrgupinge lubatud kõikumine jne. Pole raske teha töökindluskatseid näiteks ümbritseva õhu temperatuuril +35° C, suhtelise õhuniiskuse 95% juures jne. Selleks piisab lihtsatest seadmetest. Kuid katsetamisolude valimisel ja kindlaksmääramisel põrkame kokku teist laadi raskusega. Oleks äärmiselt ebaloogiline määrata näiteks tõrketusparameetreid temperatuuril +20° C, kui aparatuur on ette nähtud töötamiseks temperatuurivahemikus +10 ... +35° C; me ülehindaksime niimoodi aparatuuri töökindlust. Kuid niisama ebaloogiline oleks katsetada aparatuuri kogu aeg +35° C juures. On vähe usutav, et kõik valmistatud aparatuuri eksemplarid töötaksid temperatuuri äärmise väärtuse juures, ning katsete sellisel organiseerimisel me alahindaksime töökindlust tegelikes kasutamisoludes.

Nende ebaloogilisuste vältimiseks võiksime kasutada järgmist kahte moodust. Võiksime teatud osa katsetatavatest toodetest katsetada standardsetes tingimustes (+20 ± 1° C, 65 ± 2% õhuniiskust), teise osa maksimaalselt lubatud temperatuuril, kolmanda osa minimaalselt lubatud temperatuuril, neljanda osa maksimaalse õhuniiskuse juures jne. Mõjuvate tegurite ülejäänud väärtused oleksid seejuures nominaalsed. Katset niiviisi organiseerides saaksime veel andmeid selle kohta, kuidas mõjub üks või teine välistegur töökindlusele, näiteks võiksime leida keskmise tõrgetevahelise tööaja sõltuvuse ümbritseva õhu temperatuurist. Kuid see moodus pole vaba puudustest. Jaotanud katsetatavad tooted mitmesse ossa erinevate välismõjude järgi, võib ilmneda, et igasse gruppi jääb (katsetatavate toodete ette kindlaksmääratud üldarvu juures) niivõrd vähe tooteid, et need ei kindlusta vajalikku statistilist usaldatavust ja tulemused keskmise tõrgetevahelise tööaja ning välismõjude korrelatsiooni kohta jäävad ebamäärasteks. Ka võib juhtuda näiteks, et elektronmõõteriist ei ole ette nähtud töötamiseks mak-

simaalse õhuniiskuse juures mitte rohkem kui 7 või 10 päeva ning katsetamine maksimaalse õhuniiskuse juures 2000...3000 tunni jooksul on vastuolus mõõteriista tehniliste tingimustega.

Teine moodus seisneb selles, et katsetamisolusid muudetakse katse vältel. Teatud ajavahemiku vältel toimub katse standardsetes tingimustes. Edasi katsetatakse kõiki tooteid maksimaalselt lubatud temperatuuril, minimaalsel temperatuuril, maksimaalses õhuniiskuses jne. Tihti jaotatakse kogu katsetamisaeg tsüklitesse, kus välismõjud muutuvad tsükli ulatuses; edasi tsüklid korduvad. Kuid ka siin on raske määrata, mitu protsenti ajast katsetada standardsetel tingimustel, kõrgemal temperatuuril, suurema õhuniiskuse juures jne. Nende proportsioonide muutmisel muutub ka katsete resultaat, kuna töökindlus- (tõrketus-) parameetrite keskmine väärtus määratakse kogu katse tulemustest. Statistilised andmed temperatuuri ja suhtelise õhuniiskuse jaotumise kohta aparatuuri kasutamiseks lubatud vahemikus on niivõrd ebamäärased ja vastukäivad, et mingite järelduste tegemine on võimatu. Kui proportsioonid standardsetes ja raskendatud oludes katsetamise kestuse vahel on kord kindlaks määratud, tuleb neist rangelt kinni pidada, et kindlustada vähemalt suhtelist täpsust töökindlusparameetrite määramisel.

Nagu nägime, võib elektroonikaaparatuuri tõrkeid jaotada ilmseteks ja varjatud tõrgeteks, kusjuures domineerivaks võib tihti olla just varjatud tõrge. Elektronmõõteriistade juures (ja ka üldse) langeb varjatud tõrke ja aeglase tõrke mõiste enamasti kokku, kusjuures aeglane tõrge seisneb peamiselt mõõteriista vea suurenemises väljapoole tehnilistes tingimustes ettenähtud piire. Sellepärast nähakse elektronmõõteriistade töökindluskatsete programmis ette katsetatava mõõteriista vea perioodiline kontrollimine. Kontrollimisperioodiks võib valida 200 tundi, suurendades või vähendades seda vahemikku statistilise materjali kogunemise käigus.

Juhime tähelepanu sellele, et aparatuuri töökindluskatseid võib seostada aparatuuri detailide tõrketusparameetrite määramisega. Alati ei ole raadiodetailide tõrketuse kohta olemas küllaldaselt eksperimentaalseid andmeid, eriti kui arvestada tõrketusparameetrite sõltuvust kasutamisoludest. Ja ka aparatuuri aeglase tõrke põhjuse kõrvaldamiseks osutub sageli vajalikuks detailide

1	Tõrgete järjekorra-number	
2	Katsetatava mõõteriista number	
3	Summaarne tõrketöö aeg	
4	Tõrketöö aeg elmisest tõrkest alates	
5	Katsetamisolud	
6	Tõrke väline ilmnemine	
7	Tõrke põhjus	
8	Tõrkunud detaili tähistus skeemis ja tema tüüp	
9	kontrollimisel	Tõrge avastati
10	töötamisel	
11	Mida tehti tõrke kõrvaldamiseks	
12	Avastamiseks kulunud aeg	
13	Kõrvaldamiseks kulunud aeg	
14	Mis põhjustas tõrke	
15	Järsk tõrge	Mõõteriista tõrke liik
16	Aeglane tõrge	
17	Ilmne tõrge	
18	Varjatud tõrge	
19	Püsitõrge	
20	Isekõrvaldav tõrge	

vananemiskõverate tundmine. Need on põhjused, miks elektronmõõteriistade katsetamisel ei mõõdeta ainult aparatuuri, vaid ka üksikute detailide (võimenduslampide, täppistakistite jne.) parameetreid ja analüüsitakse neid ajaliselt.

Nagu igasuguse statistilise töö juures, määrab ka töökindluskatsete tulemuste analüüsimise hõlpsuse statistiliste andmete (tõrgete) registreerimise vorm. Allpool vaatame otstarbekaks osutunud tõrgete registreerimise tabeli näidist elektronmõõteriistade töökindluskatsetel.

Tulpa 6 kirjutatakse tunnus, mille järgi konstateeriti tõrke olemasolu («osuti on pidevalt nullis», «viga ületab lubatud normi 1,5% võrra»), tulpa 7 kirjutatakse tõrke põhjustaja («kütteniidi läbipõlemine', «täppistakisti väärtuse muutus»).

12. ja 13. tulba arvud võimaldavad määrata remonditavust iseloomustavaid suurusi, näiteks keskmist remondikestust, aga ka valmidustegurit.

Tõrgete klassifitseerimisel tulbas 14 võib kasutada järgmist jaotust:

halb ostetav detail;
halb elektriline skeem;
halb mehaaniline konstruktsioon;
halb monteerimine;
halb detail tehase omatoodangust;
halb ümberkäimine kasutamisel.

Tulba 14 andmete ümbertöötamine võimaldab leida, millistes tõrgetes on süüdi detaile valmistavad tehased, konstrueerimisbüroo, tootev tehas või ekspluatatsioonipersonal.

Aparatuuri töökindlus- (tõrketus-) katsete teostamine pole eesmärk omaette, täpsemalt, nende katsete eesmärgiks ei ole ainult tõrketusparameetrite (näiteks keskmise tõrketu tööaja) katseline leidmine. Töökindluskatsete aktiivne osa seisneb töökindluse suurendamise võimaluste väljaselgitamises ja konkreetsetes ettepanekutes elektriskeemi, mehaanilise konstruktsiooni, valmistamise tehnoloogia täiustamise jne. kohta.

Töökindluskatsete järel tuleb koostada aruanne, kuhu peab olema märgitud nii katsete tulemused kui ka konkreetsed ettepanekud aparatuuri töökindluse suurendamiseks. Kuid kui me just ei rakenda nn. kiirendatud töökindluskatsete metoodikat, s. t. ei suurenda elektrilist, soojus-

likku või mehaanilist koormust, vähendades vastavalt keskmist tõrgetevahelist tööaega, siis nõuavad töökindluskatsed mitmeid kuid, kvartaleid, aga mõnikord isegi aastaid. Kui töökindluslaboratoorium annab katsete aruande arendustöödelaboratooriumile üle alles pärast katsete lõpetamist, siis osa tulemustest on jõudnud selle aja jooksul vananeda. Teiseks pole lihtsalt võimalik oodata seni, kuni katsed lõpetatakse. Siit on ainuke väljapääs: informatsiooni üleandmine toimugu töökindluslaboratooriumilt arendustöödelaboratooriumile otsekohe ühe või teise konkreetse juhise väljakujunemise järel. Vastasel korral väheneb töökindluskatsete efektiivsus tunduvalt.

Kuid ka kõige parem kasutamisolude imiteerimine laboratooriumides ei võimalda saada neid andmeid, mida me saaksime aparatuuri kasutamisel reaalsetes oludes. Statistiliste tulemuste objektiivsus sõltub väga suurel määral sellest, kuivõrd täielikult suudetakse fikseerida kõik sündmused aparatuuri «elukäigus». Me mõtleme selle all tõrkeid, aga samuti tõrgetevahelist «puhast» tööaega. Statistiliste andmete kogumisel elektronmõõteriistade töökindluse kohta kasutatakse näiteks sellist süsteemi. Iga mõõteriista kohta, mida remonditakse tehase mõõtetehnikalaboratooriumis, täidetakse nn. tõrkekaart.

Ettevõtte nimetus: .....

Tõrkekaart

1. Mõõteriista tüüp: .....
2. Mõõteriista number: ..... Väljalaske aeg: .....
3. Kasutuselevõtmise algus: ....
4. Kasutamisolud: välitingimused, tsehhitingimused, laboratoorsed tingimused (vajalik alla kriipsutada)
5. Tõrketu tööaeg eelmisest tõrkest alates tundides: .....
6. Tõrge avastati: valmistajalt vastuvõtmisel, laost saamisel, kontrollimisel, töötamise ajal (vajalik alla kriipsutada)
7. Tõrke väline ilmnemine: .....

.....

8. Tõrke põhjus: .....

.....

9. Tõrkunud detaili number põhimõtteskeemi järgi: .....
10. Detaili tüüp ja nimiväärtus: .....

11. Mida tehti tõrke kõrvaldamiseks: .....

.....

12. Tõrke avastamiseks kulunud aeg tundides: .....
13. Tõrke kõrvaldamiseks kulunud aeg tundides: .....
14. Remontimise kuupäev: .....

Tõrkekaardi täitis: .....

Samuti täidetakse tõrkekaart, kui mõõteriista perioodilisel kontrollimisel, mis toimub kuue kuu, aasta jne. tagant samas mõõtetehnikalaboratooriumis, leitakse, et mõõteriista viga on lubatust suurem, s. t. kui on tegemist aeglase (ja muidugi ka varjatud) tõrkega.

Tõrkekaardi 5. punktis tuleb näidata tõrketu tööaeg tundides eelmisest tõrkest alates. On ilmne, et kui jääb täitmata see punkt, on võimatu leida tõrketusparameetreid tõrkekaartide ümbertöötamisel. Kuid samal ajal on selle punkti täitmine seotud ka kõige suuremate raskustega, kusjuures halvim on olukord mitteperioodiliselt kasutatavate laboratoorsete mõõteriistade puhul. Äärmisel juhul võib siin kasutada kahe remondi vahelise tööpäevade arvu korrutamist analoogiliste mõõteriistade keskmise töötundide arvuga päevas.

Tehase mõõtetehnikalaboratooriumis täidetud tõrkekaardid antakse tehase töökindluslaboratooriumisse esialgseks analüüsiks ja edasisaatmiseks vaadeldavaid mõõteriistu tootvasse tehasesse või mõnda kesksesse uurimisinstituuti, kuhu paljude organisatsioonide tõrkekaardid koondatakse üldistamiseks.

4.2. Katsetulemuste tõlgitsemine

Senini ei tundnud me huvi, kui täpselt saab eelmises paragrahvis toodud valemite abil määrata keskmist tõrketut tööaega, tõrkeintensiivsust, keskmist tõrgetevahelist tööaega ja tõrkevoo parameetrit. Probleemist parema ettekujutuse saamiseks alustame ühest lihtsamast ning sugugi mitte vähetähtsast näitest.

Kujutleme idealiseeritud raadiotehnilist detaili, kus järsud tõrked esinevad äärmiselt harva, seevastu aga peamist osa etendavad vananemis- ja kulumisprotsesside tagajärjel tekkinud aeglased tõrked. Siis me võime järskude tõrgete intensiivsuse võtta võrdseks nulliga ja vaadelda ainult aeglasi tõrkeid. Aeglase tõrketa tööaja

jaotuse võime lugeda normaalseks. Nagu teada, on tõrketu tööaja normaaljaotus antud kahe parameetriga t_k ja σ ning tema tõenäosustihedus

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(t - t_k)^2}{2\sigma^2} \right],$$

kus t_k on keskmine tõrketu tööaeg, aga σ on tõrketu tööaja ruutkeskmine hälve. Tõenäosustiheduse graafik on toodud näiteks joonisel 1. 2. 3. Eeldame, et $t \geqslant 0$, millega teeme (kui $t_k - 3\sigma > 0$) tähtsusetu vea. Antud näites langeb tõrketu tööaja mõiste kokku tehnilise ressursi mõistega ja keskmine tõrketu tööaeg keskmise tehnilise ressursiga.

Kuid suuruste t_k ja σ väärtused on meile teadmata ning nende määramiseks peame tegema vastava katse. Toimugu katse järgmiselt: m detaili katsetatakse kuni kõigi m detaili töökõlbmatuks muutumiseni ning leitakse tõrketud tööajad $t_1, t_2 \ldots t_m$. Keskmise tõrketu tööaja hinnangu $\hat{t}_k$ arvutame valemist

$$\hat{t}_k = \frac{\sum_{i=1}^{m} t_i}{m}, \qquad (4.2.1)$$

aga ruutkeskmise hälbe hinnangu, mida mõnikord tähistatakse ka s-ga, valemist

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m} (t_i - \hat{t}_k)^2}{m - 1}}, \qquad (4.2.2)$$

kus kõik tõrketud tööajad t_i on juhuslikud muutujad.

Tuleb teha vahet keskmise tõrketu tööaja tegeliku väärtuse t_k ja tema katsetulemustest saadud hinnangu $\hat{t}_k$ vahel. Tõepoolest, kui tõrketud tööajad t_i on juhuslikud muutujad, on seda ka keskmise tõrketu tööaja hinnang $\hat{t}_k$, kuna ta saadakse m juhusliku muutuja summa jagamisel mittejuhusliku suurusega $m - 1$.

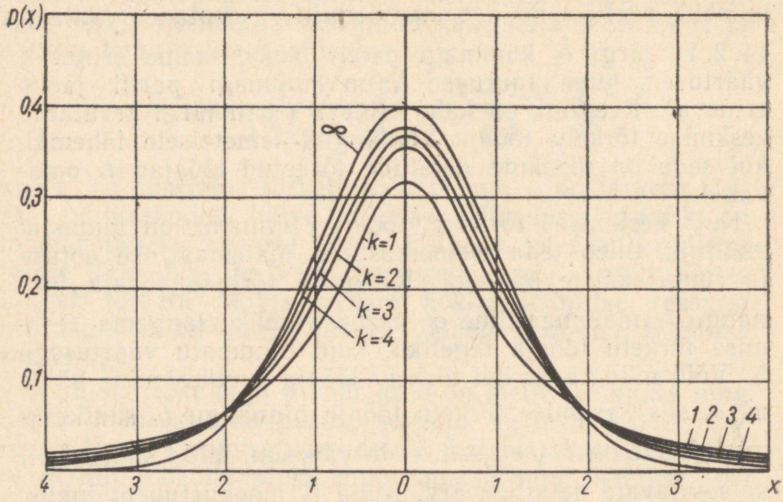
Tõrketu tööaja hinnangu t_k juhuslikkus väljendub näiteks järgmiselt. Kujutame endale kahte partiid idealiseeritud (ülaltoodud mõistes) raadiodetaile, kusjuures

kumbki partii sisaldab m detaili. Arvutades valemi (4. 2. 1) järgi $\hat{t}_k$ kummagi partii jaoks, saame erinevad väärtused, kuna suurused t_i on kummagi partii jaoks erinevad. Reeglina on kahe erineva partii järgi arvutatud keskmise tõrketu tööaja hinnangud teineteisele lähemal, kui seda on üksikute detailide tõrketud tööajad t_i omavahel.

Kui keskmise tõrketu tööaja hinnang on juhuslik muutuja, tuleb teda iseloomustada matemaatilise ootuse ja ruutkeskmise hälbega. Keskmise tõrketu tööaja hinnangu $\hat{t}_k$ matemaatiline ootus peab kokku langema keskmise tõrketu tööaja tegeliku, kuid tundmatu väärtusega t_k. Võib näidata, et kui tõrketu tööaja ruutkeskmine hälve on σ, siis keskmise tõrketu tööaja hinnangu $\hat{t}_k$ ruutkeskmine hälve on $\sigma/\sqrt{m}$, s. t. seda väiksem, mida suurem oli katsetatavate detailide arv. Kuna $\hat{t}_k$ moodustub m juhusliku muutuja summast, on suure liidetavate arvu korral tõenäoline, et negatiivsed ja positiivsed hälbed omavahel kompenseeruvad ning seda täielikumalt, mida rohkem on liidetavaid.

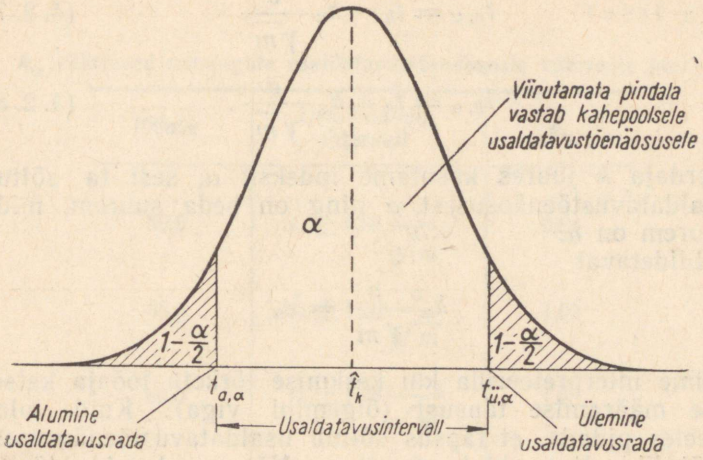
Me eeldasime, et detailide tõrketu tööaeg on jaotunud normaalselt. Matemaatilise statistika kursustes näidatakse, et juhusliku muutuja $\dfrac{\hat{t}_k - t_k}{\hat{\sigma}/\sqrt{m}}$ jaotuseks on nn. Studenti $m - 1$ vabadusastmega t-jaotus (vt. joon. 4. 2. 1). Kuid allpool me eeldame, et ka $\hat{t}_k$ on jaotunud normaalselt ja seda kahel põhjusel. Esiteks läheneb Studenti t-jaotus vabadusastmete arvu kasvades normaaljaotusele, teiseks võime me väikeste m väärtuste korral vaadelda normaaljaotust lihtsalt kui mugavat lähendust.

Valemi (4. 2. 1) järgi arvutatud keskmise tõrketu tööaja hinnangut nimetatakse punkthinnanguks, kuna me saime punkti ajateljel, mille ligiduses asetseb meile tundmatu tegelik keskmine tõrketu tööaeg. Punkthinnang ei anna meile mingisugust ettekujutust keskmise tõrketu tööaja määramise täpsuse kohta. Kuid võib kasutada ka sellist hindamisviisi, mis arvestaks katsetulemuste võimalikku ebatäpsust (vt. joonis 4. 2. 2). Oletame, et me arvutasime valemi 4. 2. 1 järgi keskmise tõrketu tööaja punkthinnangu. Vaatleme intervalli, mis sisaldab punkthinnangu t_k. Olgu



Joon. 4. 2. 1. Studenti jaotuse tõenäosustihedus erinevate vabadusastmete arvu korral

$\hat{t}_k$ selle intervalli keskpunktiks. Tegelik keskmine tõrketu tööaeg asub teatud tõenäosusega kusagil selles intervallis. Mida suurem on intervall, seda suurem on tõenäosus, et tegelik keskmine tõrketu tööaeg asub selles intervallis, ning vastupidi, mida suurem on tõenäosuse väärtus, seda suurem peab olema intervall, et ta antud tõenäosusega sisaldaks keskmise tõrketu tööaja tegeliku väärtuse. Tähistame selle tõenäosuse α-ga, mida nimetatakse usaldatavustõenäosuseks. Tõrketuskatse resultaati — keskmise tõrketu tööaja väärtust — tahame me teada küllaldase kindlusega, sellepärast valitakse α väärtuseks 0,80; 0,90; 0,95; 0,99 jne. Intervalli nimetatakse usaldatavusintervalliks ning tema otspunkte vastavalt alumiseks ja ülemiseks usaldatavusrajaks. Viirutamata pindala joonisel 4. 2. 2 vastab usaldatavustõenäosusele α, viirutatud pindala tõenäosusele $1 - \alpha$. Teiste sõnadega, α on tõenäosus, et keskmine tõrketu tööaeg asub alumise ja ülemise usaldatavusraja vahel, $1 - \frac{\alpha}{2}$ on tõenäosus, et tõrketu tööaeg on väiksem kui alumine usaldatavusrada, ning samuti tõenäosus, et keskmine tõrketu tööaeg on suurem kui ülemine usaldatavusrada. $1 - \alpha$ vastaks



Joon. 4. 2. 2. Kahepoolne usaldatavustõenäosus

tõenäosusele, et tegelik keskmine tõrketu tööaeg asub väljaspool usaldatavusintervalli.

Alumise ja ülemise usaldatavusraja võiks tähistada vastavalt t_a ja $t_{ü}$. Kuid usaldatavusradade väärtused sõltuvad usaldatavustõenäosustest α. Sellepärast on õigem kasutada tähistust $t_{a,\alpha}$ ja $t_{ü,\alpha}$. Siis on

$$P\{t_k < t_{a,\alpha}\} = 1 - \frac{\alpha}{2}; \qquad (4.2.3)$$

$$P\{t_{a,\alpha} \leqslant t_k \leqslant t_{ü,\alpha}\} = \alpha; \qquad (4.2.4)$$

$$P\{t_{ü,\alpha} < t_k\} = 1 - \frac{\alpha}{2}; \qquad (4.2.5)$$

$$P\{t_k < t_{a,\alpha} \quad \text{või} \quad t_{ü,\alpha} < t_k\} = 1 - \alpha. \qquad (4.2.6)$$

Kuna me vaatleme tõenäosust α, et juhuslik muutuja on suurem mingisugusest väärtusest $t_{a,\alpha}$ ja väiksem mingist teisest väärtusest $t_{ü,\alpha}(t_{a,\alpha} < t_{ü,\alpha})$, on tõenäosus α kahepoolne usaldatavustõenäosus.

Alumise ja ülemise usaldatavusraja võime avaldada tõrketu tööaja ruutkeskmise hälbe σ kaudu. Nagu teame, on $\frac{\sigma}{\sqrt{m}}$ keskmise tõrketu tööaja ruutkeskmine hälve m detaili katsetamisel. Me võime kirjutada, et

$$t_{a,\alpha} = \hat{t}_k - k_\alpha \frac{\sigma}{\sqrt{m}} \qquad (4.2.7)$$

ja

$$t_{\ddot{u},\alpha} = \hat{t}_k + k_\alpha \frac{\sigma}{\sqrt{m}}. \qquad (4.2.8)$$

Kordaja k juures kasutame indeksit α, sest ta sõltub usaldatavustõenäosusest α ning on seda suurem, mida suurem on α.

Liidetavat

$$k_\alpha \frac{\sigma}{\sqrt{m}} = \varepsilon_\alpha$$

võime interpreteerida kui keskmise tõrketu tööaja katselise määramise täpsust (õigemini viga). Kuid tuleb meeles pidada, et täpsus sõltub usaldatavustõenäosusest (või lihtsalt usaldatavusest) α. Näeme, et mida täpsemalt me kirjutame keskmise tõrketu tööaja, seda vähem usaldatavad on need andmed, ja vastupidi, kui me tahame suure usaldatavusega näidata vahemikku, kus asub keskmise tõrketu tööaja tegelik väärtus, peame suurendama selle vahemiku pikkust. Öeldu kehtib muidugi katsetatavate detailide arvu konstantsuse korral. Kui me suurendame katsetatavate detailide arvu m, siis sama usaldatavustõenäosuse α juures suureneb täpsus, s. t. väheneb ε_α.

Tabelis 4.2.1 on toodud k_α väärtused mõningate usaldatavustõenäosuste väärtuste jaoks, mis on koostatud vigade integraali (normaalse normeeritud jaotusfunktsiooni) väärtuste tabeli põhjal raamatu lisas II. Seda tabelit soovitatakse kasutada, kui katsetatavate detailide arv m on 25 või rohkem. Väiksema m väärtuse korral võib teda vaadelda kui ligikaudset lähendust.

Tutvume nüüd lühidalt ühepoolse usaldatavustõenäosuse ja ühepoolse usaldatavusraja mõistega. Vaatleme üht töökindluskatsete tõlgitsemisel esinevat ülesannet. Olgu nõutav keskmine tõrketu tööaeg T_0 või rohkem. (T_0 võib olla selleks väärtuseks, mis on kirja pandud detaili tehnilistes tingimustes.) Kontrollimiseks, kas detailid vastavad esitatud nõudele, katsetatakse m detaili kuni nende töökõlbmatuks muutumiseni ja valemi (4.2.1) abil arvutatakse keskmise tõrketu tööaja hinnang $\hat{t}_k$. Kui $\hat{t}_k < T_0$,

k_α väärtused mõningate usaldatavustõenäosuste väärtuste jaoks

$100\alpha\%$	Usaldatavus-intervall	k_α
60,0	$\hat{t}_k \pm 0{,}84 \frac{\sigma}{\sqrt{m}}$	0,84
68,3	$\hat{t}_k \pm 1{,}00 \frac{\sigma}{\sqrt{m}}$	1,00
80,0	$\hat{t}_k \pm 1{,}28 \frac{\sigma}{\sqrt{m}}$	1,28
86,6	$\hat{t}_k \pm 1{,}50 \frac{\sigma}{\sqrt{m}}$	1,50
90,0	$\hat{t}_k \pm 1{,}64 \frac{\sigma}{\sqrt{m}}$	1,64
95,0	$\hat{t}_k \pm 1{,}96 \frac{\sigma}{\sqrt{m}}$	1,96
95,4	$\hat{t}_k \pm 2{,}00 \frac{\sigma}{\sqrt{m}}$	2,00
99,0	$\hat{t}_k \pm 2{,}58 \frac{\sigma}{\sqrt{m}}$	2,58
99,7	$\hat{t}_k \pm 3{,}00 \frac{\sigma}{\sqrt{m}}$	3,00
99,9	$\hat{t}_k \pm 3{,}29 \frac{\sigma}{\sqrt{m}}$	3,29

ei teki kellelgi kahtlust selles, et detailid ei vasta tõrketuse suhtes esitatud nõudele. Oletame, et katse tulemusena leidsime, et $\hat{t}_k > T_k$ ($t_k = T_0$ on praktiliselt võimatu). Millise järelduse võime teha?

Kui $\hat{t}_k > T$, siis ei saa teha kategoorilist järeldust, et

katsetulemus on positiivne ja detailid vastavad tõrketuse suhtes esitatud nõudele. Kuid see järeldus on õige ainult siis, kui $\hat{t}_k$ on tunduvalt suurem kui T_0. Oletame, et $\hat{t}_k$ ei erine tunduvalt T_0-st («erineb tunduvalt» ja «ei erine tunduvalt» saavad rangema sisu allpool, kui vaadeldakse usaldatavustõenäosuse mõistet). Siis pole välistatud võimalus, et katse andis positiivse resultaadi juhuslikult selle tõttu, et m detaili tõrketud tööajad on juhuslikud suurused. Selline võimalus on seda tõenäolisem, mida ligemal on $\hat{t}_k$ T_0-le. Selline võimalus on seda vähem tõenäoline, mida suurem on katsetatavate detailide arv m, kuna seda paremini kompenseeruvad juhuslikud erisuunalised hälbed tegelikust keskmisest tõrketust tööajast t_k.

Toome sisse usaldatavustõenäosuse α mõiste, mida nimetame ühepoolseks usaldatavustõenäosuseks. Samuti kasutame ühepoolse usaldatavusraja t_α mõistet. Ühepoolne usaldatavusrada ja usaldatavustõenäosus on siis erinevalt valemeist 4.2.3 ... 4.2.6 seotud valemitega

$$P\{t_k < t_\alpha\} = 1 - \alpha \qquad (4.2.9)$$

ja

$$P\{t_\alpha \leqslant t_k\} = \alpha, \qquad (4.2.10)$$

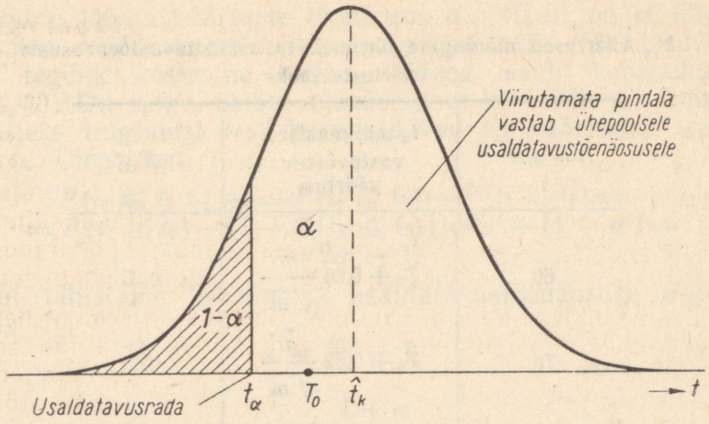
s t. tõenäosus, et tegelik keskmine tõrketu tööaeg t_k on suurem kui usaldatavusrada t_α, on α.

Nagu valemites (4.2.7) ja (4.2.8) avaldame ka siin usaldatavusraja t_α keskmise tõrketu tööaja t_k ruutkeskmise hälbe $\frac{\sigma}{\sqrt{m}}$ kaudu järgmiselt:

$$t_\alpha = \hat{t}_k - k'_\alpha \frac{\sigma}{\sqrt{m}}. \qquad (4.2.11)$$

Kordaja $\frac{\sigma}{\sqrt{m}}$ ette peame kirjutama k'_α, kuna see mitte ainult ei sõltu ühepoolsest usaldatavustõenäosusest α, vaid on ka erinev valemites (4.2.7) ja (4.2.8) kasutatud kordajast, sest seal oli meil tegemist kahepoolse usaldatavustõenäosusega.

Oletame, et meid rahuldab usaldatavus $100\alpha\%$ (90%



Joon. 4. 2. 3. Ühepoolne usaldatavustõenäosus

näiteks). Siis loeme katsetulemuse positiivseks, kui (vt. joon. 4. 2. 3) pindala kõvera all paremal pool punkti T_0 on võrdne või suurem α (tõenäosus, et tegelik keskmine tõrketu tööaeg t_k on suurem kui T_0, on α). Sellepärast võime kirjutada, et katsetulemus on positiivne, kui

$$T_0 \leqslant t_\alpha$$

või

$$T_0 \leqslant \hat{t}_k - k'_\alpha \frac{\sigma}{\sqrt{m}}$$

ehk lõplikult — $\hat{t}_k$ peab rahuldama võrratust

$$\hat{t}_k \geqslant T_0 + k'_\alpha \frac{\sigma}{\sqrt{m}}. \qquad (4.2.12)$$

Tabelis 4. 2. 2 on toodud mõningate ühepoolsete usaldatavustõenäosuste α jaoks teguri k_α' väärtused, aga samuti $\hat{t}_k$ väärtused, mis rahuldavad võrratust (4. 2. 12). Ka siin on koostamisel kasutatud tabelit lisast II.

Esitatud arutlused oleksid ranged, kui meil oleks teada detailide tööaja ruutkeskmine hälve σ. Kuid praktiliselt saame katsetest arvutada tema hinnangu $\hat{\sigma}$. Võrdus $\sigma = \hat{\sigma}$ on õige ainult suurtel m väärtustel. Väikestel m väärtustel ($m < 25$) võime rääkida ainult teatud

Tabel 4.2.2

k'_α väärtused mõningate ühepoolsete usaldatavustõenäosuste väärtuste jaoks

100 α%	$\hat{t}_k$ minimaalselt vastuvõetav väärtus	k'_α
60	$T_0 + 0{,}25\frac{\sigma}{\sqrt{m}}$	0,25
70	$T_0 + 0{,}52\frac{\sigma}{\sqrt{m}}$	0,52
80	$T_0 + 0{,}84\frac{\sigma}{\sqrt{m}}$	0,84
90	$T_0 + 1{,}28\frac{\sigma}{\sqrt{m}}$	1,28
95	$T_0 + 1{,}64\frac{\sigma}{\sqrt{m}}$	1,64
99	$T_0 + 2{,}33\frac{\sigma}{\sqrt{m}}$	2,33

lähendusest. Kuid leides k_α ja k_α' Studenti t-jaotuse väärtuste tabelist $m-1$ vabadusastme jaoks (vt. näiteks [6]), võib neid seoseid kasutada ka väikestel m väärtustel.

Leiame, milline on seos ühepoolsete ja kahepoolsete usaldatavustõenäosuste vahel. Olgu t_1 ja t_2 $(t_1 < \hat{t}_k < t_2)$ väärtused, mis rahuldavad tingimusi

$$P(t_1 \leqslant t_k) = \alpha'$$

ja

$$P(t_k \leqslant t_2) = \alpha',$$

ehk teisiti t_1 ja t_2 määratakse tingimusest, et väärtusest t_1 suuremate keskmise tõrketu tööaja väärtuste tõenäosus on α' ning samuti on väärtusest t_2 väiksemate keskmise

tõrketu tööaja väärtuste tõenäosus α'. Niisiis on α' ühepoolne usaldatavustõenäosus. Leiame nüüd tõenäosuse, et tegelik keskmine tõrketu tööaeg asub vahemikus (t_1, t_2). On selge, et see tõenäosus ei ole mitte α', kuna näiteks tingimust $t_1 \leqslant t_k$ rahuldavad ka väärtused $t_2 < t_k$. Tõepoolest,

$$P(t_1 \leqslant t_k \leqslant t_2) = P(t_1 \leqslant t_k) - P(t_2 < t_k) =$$
$$= P(t_1 \leqslant t_k) - [1 - P(t_k \leqslant t_2)] = \alpha' - [1 - \alpha'] =$$
$$= 2\alpha' - 1.$$

Kui tähistame kahepoolse usaldatavustõenäosuse α-ga, siis

$$\alpha = 2\alpha' - 1$$

ja

$$\alpha' = \frac{1 + \alpha}{2}.$$

Tabel 4.2.3 illustreerib kaht viimast valemit.

Tabel 4.2.3

Ühe- ja kahepoolse usaldatavustõenäosuse mõningaid vastavaid väärtusi

α'	0,999	0,990	0,975	0,950	0,900	0,800
α	0,998	0,980	0,950	0,900	0,800	0,600

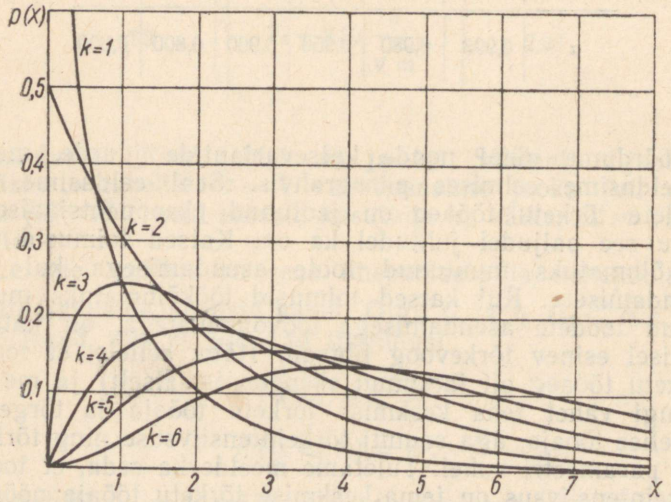
Pöördume nüüd nende katsevariantide juurde, mida kirjeldasime eelmises paragrahvis. Seal eeldasime, et toodete tõrketu tööaeg on jaotunud eksponentsiaalselt, nagu see paljudel juhtudel ka on. Katsed toimusid nii töökõlbmatuks muutunud toote asendamisega kui ka asendamiseta. Kui katsed toimusid töökõlbmatuks muutunud toodete asendamisega töövõimelistega, oli katsetamisel esinev tõrkevoog lihtsam (tänu sellele, et toote tõrketu tööaeg oli jaotunud eksponentsiaalselt) ja me ei pruugi vahet teha keskmise tõrketu tööaja ja tõrgetevahelise tööaja, aga samuti tõrkeintensiivsuse ning tõrkevoo parameetri vahel. Tuletame meelde ka seda, et toote tõrkeintensiivsus on tema keskmise tõrketu tööaja pöördväärtus.

Selles paragrahvis nägime, et valemid (4.1.5), (4.1.6),

(4. 1. 8) ja (4. 1. 13) annavad toote keskmise tõrketu tööaja hinnangu. Tegeliku keskmise tõrketu tööaja kohta võime katsetulemuse põhjal väita, et ta asub teatud usaldatavustõenäosusega α teatud usaldatavusintervallis. Usaldatavusintervall määratakse katsetulemustest arvutatud keskmise tõrketu tööaja punkthinnanguga $\hat{t}_k$, usaldatavustõenäosusega α ja katsetel esinenud tõrgete arvuga. Kuna tõrgete arv on seda suurem, mida suurem on katsetatavate toodete arv ja mida pikem on katse kestus, sõltub usaldatavusintervalli pikkus ka nendest suurustest.

Praktiliseks kasutamiseks on otstarbekohased tabelid [8], mis võimaldavad keskmise tõrketu tööaja hinnangu korrutamisel tabelist saadud teguriga leida alumise ja ülemise usaldatavusraja. Selgitame nende tabelite kasutamist, mis on paigutatud lisasse IV, lihtsate näidetega erinevate katsevariantide korral.

Vaatleme katsemetoodikat a. eelnevast paragrahvist. Keskmise tõrketu tööaja hinnang $\hat{t}_k$ oli meil arvutatud valemiga (4. 1. 5). Võib näidata, et korrutise $m\,t_k$ jaotuseks on 2 m vabadusastmega χ^2-jaotus parameetriga



Joon. 4. 2. 4. χ^2-jaotuse tõenäosustihedus (k — vabadusastmete arv)

t_k, kus t_k on keskmise tõrketu tööaja tegelik (meile tundmatu) väärtus (vt. joon. 4. 2. 4). Alumine usaldatavusrada t_a ja ülemine usaldatavusrada $t_{ü}$ arvutatakse valemitest

$$t_a = r_3 \hat{t}_k \qquad (4.2.13)$$

ja

$$t_{ü} = r_1 \hat{t}_k, \qquad (4.2.14)$$

kus r_1 ja r_3 leitakse tabelitest lisas IV vastavate m ja α' väärtuste jaoks. Tabelites lisas IV on antud tegurid ühepoolsete usaldatavusradade määramiseks. Kui meid huvitab kahepoolne usaldatavustõenäosus α, tuleb eelnevalt tabeli 4. 2. 3 abil leida vastavad ühepoolsed usaldatavustõenäosused α'.

Näide 4. 2. 1. 100 dioodi katsetati 700 tunni vältel. Selle aja jooksul muutus töökõlbmatuks 5 dioodi vastavalt 30, 290, 510, 600 ja 690 tunni pärast. Eeldatakse, et dioodide tõrketu tööaeg on jaotunud eksponentsiaalselt. Leida keskmise tõrketu tööaja usaldatavusintervall kahepoolse usaldatavustõenäosusega 0,90.

Lahendus. Valemi (4. 1. 5) järgi

$$\hat{t}_k = \frac{30 + 290 + 510 + 600 + 690 + 95 \cdot 700}{5} = 13\,700 \text{ h}.$$

Valemite (4. 2. 13) ja (4. 2. 15) järgi

$$t_a = 0{,}55 \cdot 13\,700 = 7500 \text{ h},$$
$$t_{ü} = 2{,}54 \cdot 13\,700 = 34\,800 \text{ h}.$$

Tegurid r_1 ja r_3 leidsime tabelitest $\alpha' = 0{,}95$ ja $m = 5$ jaoks.

Näeme, et väikesest tõrgete arvust tingituna on keskmise tõrketu tööaja määramine äärmiselt ebatäpne.

Katsevariant b., mida me samuti kirjeldasime eelmises paragrahvis, erineb ainult selle poolest, et ta lõpetatakse pärast kõigi toodete töökõlbmatuks muutumist, s. t. $m = N_0$ (vt. valemis (4. 1. 6) toodud). Võib näidata, et siin on meil tegemist keskmise tõrketu tööaja $2m$ vabadusastmega χ^2-jaotusega. Usaldatavusradade leidmiseks tuleb ka siin kasutada valemeid (4. 2. 13) ja (4. 2. 14).

Näide 4. 2. 2. Kümne toote keskmise tõrketu tööaja katselisel määramisel leiti, et $\hat{t}_k = 1000$ h. Leida ühepoolsed usaldatavusrajad usaldatavustõenäosuse väärtuse 0,9 korral.

Lahendus. Tabelitest lisas IV leiame, et $m = 10$ ja $\alpha' = 0{,}90$ juures $r_1 = 1{,}61$ ja $r_3 = 0{,}70$. Siit

$$t_a = 0{,}70 \cdot 1000 = 700 \text{ h};$$
$$t_{ü} = 1{,}61 \cdot 1000 = 1610 \text{ h},$$

s. t. tõenäosusega 0,9 on meile tundmatu t_k suurem kui 700 h ja väiksem kui 1610 h.

Selgitame, kuidas määratakse alumist ja ülemist usaldatavusrada, kui kasutame varianti d. eelmisest paragrahvist. Nagu me mäletame, asendatakse töökõlbmatuks muutunud tooted uutega või remonditakse, nii et katsetatavate toodete arv N_0 on konstantne. Katse kestab t' tundi. Katsete käigus määratakse tõrgete arv n.

Keskmise tõrketu tööaja (keskmise tõrgetevahelise tööaja) hinnang arvutatakse siis valemist (4. 1. 13). Alumine ühepoolne usaldatavusrada määratakse valemiga

$$t_a = r_2 \hat{t}_k \tag{4. 2. 15}$$

ja ülemine ühepoolne usaldatavusrada valemiga

$$t_{\ddot{u}} = r_1 \hat{t}_k. \tag{4. 2. 16}$$

Tegurite r_1 ja r_2 väärtused võetakse tabelitest lisas IV etteantud ühepoolse usaldatavustõenäosuse α' ja $m = n$ jaoks.

Tõrkeintensiivsuse alumine ja ülemine ühepoolne usaldatavusrada määratakse valemitega

$$\lambda_a = \frac{\hat{\lambda}}{r_1} \tag{4. 2. 17}$$

ja

$$\lambda_{\ddot{u}} = \frac{\hat{\lambda}}{r_2}, \tag{4. 2. 18}$$

kus $\hat{\lambda}$ arvutatakse valemist (4. 1. 12).

Näide 4. 2. 3. 2000 tunni vältel katsetati 15 mõõteriista. Tõrke korral mõõteriist remonditi. Kokku oli 30 tõrget. Leida keskmise tõrketu tööaja ja tõrkeintensiivsuse punkthinnangud ja kahepoolne usaldatavusintervall usaldatavustõenäosusega 0,8.

Lahendus. $\alpha' = 0{,}9$ ja $n = m = 30$ jaoks leiame tabelitest lisas IV järgmised väärtused: $r_1 = 1{,}29$; $r_2 = 0{,}78$.

Valemitest (4. 1. 12) ja (4. 1. 13) arvutame

$$\hat{\lambda} = \frac{30}{15 \cdot 2000} = 10^{-3} \frac{1}{\text{h}}$$

ja

$$\hat{t}_k = \frac{15 \cdot 2000}{30} = 1000 \text{ h}.$$

Valemitest (4. 2. 15) ... (4. 2. 18) arvutame

$$t_a = 0{,}78 \cdot 1000 = 780 \text{ h},$$

$$t_{\ddot{u}} = 1{,}29 \cdot 1000 = 1290 \text{ h},$$

$$\lambda_a = \frac{10^{-3}}{1{,}29} = 0{,}77 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{h}}$$

$$\lambda_{\ddot{u}} = \frac{10^{-3}}{0{,}78} = 1{,}28 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{h}}.$$

Lõplikult leiame tegeliku keskmise tõrketu tööaja t_k ja tegeliku tõrkeintensiivsuse λ jaoks, et 80%-lise tõenäosusega asuvad nad vahemikkudes

$$780 \text{ h} < t_k < 1290 \text{ h},$$

$$0{,}77 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{h}} < \lambda < 1{,}28 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{h}}.$$

On olemas võimalus, et katse käigus ei ilmnenud ühtegi tõrget ($n = m = 0$). Tõepoolest, kui on tegemist töökindlate toodetega, kui katsetatavate toodete arv on väike ja katse lühiajaline, on selline olukord ettekujutatav. Pole raske mõista, et sellisel juhul on igasuguse usaldatavustõenäosuse jaoks keskmise tõrketu tööaja ülemine usaldatavusrada lõpmatus ja tõrkeintensiivsuse alumine usaldatavusrada 0. Kuid keskmise tõrketu tööaja alumine usaldatavusrada sõltub sellest, milline oli katsetatavate toodete arv N_0, katse kestus ning loomulikult ka usaldatavustõenäosuse α väärtus. Sama kehtib ka tõrkeintensiivsuse ülemise usaldatavusraja kohta. Mida pikem oli ajavahemik, mille vältel ei esinenud tõrkeid, seda suurem on keskmise tõrketu tööaja alumine usaldatavusrada. Mida rohkem oli tooteid (katse konstantse kestuse juures), mis tõrketult töötasid kogu katse vältel, seda suurem on alumine usaldatavusrada.

Kui $n = m = 0$, võime kasutada seoseid

$$t_a = r_0 N_0 t', \tag{4.2.19}$$

$$t_{\ddot{u}} = \infty, \tag{4.2.20}$$

$$\lambda_a = 0 \tag{4.2.21}$$

ja

$$\lambda_{\ddot{u}} = \frac{1}{r_0 N_0 t'}. \tag{4.2.22}$$

Teguri r_0 väärtused erinevatel usaldatavustõenäosuse väärtustel α' on toodud tabelis lisas IV.

Näide 4.2.4. 5 mõõteriista katsetati 400 tunni jooksul, kusjuures ei esinenud ühtegi tõrget. Leida keskmise tõrketu tööaja alumine usaldatavusrada usaldatavustõenäosusega 0,9.

Lahendus. Teguri r_0 väärtuste tabelist lisas IV leiame, et $\alpha' = 0{,}9$ korral $r_0 = 0{,}43$. Valemist (4.2.19) arvutame,

$$t_a = 0{,}43 \cdot 5 \cdot 400 = 860 \text{ h}.$$

Erinevalt praegu käsitletud variandist on variandis e., mida kirjeldasime eelmises paragrahvis, juhuslik mitte tõrgete arv, vaid katse kestus, kuna katse lõpetatakse kohe pärast ette kindlaksmääratud m tõrke toimumist. Kuna tõrgete arv katse kindla kestuse juures ja katse kestus kindla tõrgete arvu juures on jaotunud erinevate jaotusseaduste järgi, toimub ka usaldatavusradade arvutamine erinevalt. Siin võib kasutada valemeid

$$t_a = r_3 \hat{t}_k, \tag{4.2.23}$$

$$t_{\ddot{u}} = r_1 \hat{t}_k, \tag{4.2.24}$$

$$\lambda_a = \frac{\hat{\lambda}}{r_1} \tag{4.2.25}$$

ja

$$\lambda_{\ddot{u}} = \frac{\hat{\lambda}}{r_3}, \tag{4.2.26}$$

kus $\hat{t}_k$ ja $\hat{\lambda}$ määratakse valemitest (4.1.12) ja (4.1.13).

Näide 4.2.5. Oletame, et 15 mõõteriista katsetati seni, kuni tähel-dati 30 tõrget. Oletame, et 30. tõrge tekkis 2000 tunni pärast, s. t. arvud on samad mis näites 4.2.3, kuid katse metoodika erineb. Kahepoolne usaldatavustõenäosus $\alpha = 0{,}80$. Leida t_k ja λ usaldata-vusintervallid.

Lahendus. Teguri r_3 väärtuste tabelist lisas IV leiame, et $\alpha' = 0{,}90$ juures $r_3 = 0{,}80$. $t_{\ddot{u}}$ ja λ_a väärtused on leitud näites 4.2.3. Leiame:

$$t_a = 0{,}80 \cdot 1000 = 800 \text{ h},$$

$$\lambda_{\ddot{u}} = \frac{10^{-3}}{0{,}80} = 1{,}25 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{h}}$$

ning

$$800 \text{ h} < t < 1290,$$

$$0{,}77 \cdot 10^{-3} < \lambda < 1{,}25 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{h}}.$$

Näeme, et näidete 4.2.3 ja 4.2.5 vastused on lähedased.

Meil on jäänud veel usaldatavusrajad määrata juhul, kui katse toimub meetodil c. Vastavad tabelid usaldata-vusradade määramiseks võib leida [8]. Radade leidmine põhimõtteliselt ei erine eespool toodud moodustest.

Vaatleme nüüd kaht konkreetset ülesannet. Oletame, et aparatuuri (mõõteriistade, raadiovastuvõtjate, televiisorite jne.) konstrueerimise tehnilises ülesandes nõutakse, et aparatuuri keskmine tõrketu tööaeg oleks vähemalt T_0. Et kontrollida, kas tehnilise ülesande nõudmised tõrke-tuse osas on täidetud, teostatakse töökindluskatse. Katseks seatakse üles N_0 aparaati. Tõrke tekkimisel mõnes nendest N_0 aparaatidest nad remonditakse. Katse kestus on t'. Selle aja jooksul toimugu n tõrget. Siis võime keskmise tõrketu tööaja hinnangu arvutada valemeist (4.1.13), mille veel kord välja kirjutame:

$$\hat{t}_k = \frac{N_0 t'}{n}.$$

Oletame, et meid rahuldab 100 α%-line usaldatavus. Siis võime valemite (4.2.15) ja (4.2.16) abil arvutada alu-mise ja ülemise usaldatavusraja

$$t_a = r_2 \frac{N_0 t'}{n}$$

ja

$$t_{\ddot{u}} = r_1 \frac{N_0 t'}{n}.$$

Usaldatavusradade t_a ning $t_{\ddot{u}}$ ja tehnilise ülesande nõude T_0 omavahelises asetuses esineb kolm võimalust:

1) $T_0 < t_a$;
2) $t_a < T_0 < t_{\ddot{u}}$;
3) $t_{\ddot{u}} < T_0$.

Esimesel juhul on keskmine tõrketu tööaeg t_k tõenäosusega mitte vähem kui α suurem kui T_0, s. t. aparatuur vastab tehnilise ülesande nõudmisele. Kolmandal juhul on keskmine tõrketu tööaeg t_k tõenäosusega mitte vähem kui α väiksem kui T_0, s. t. aparatuur ei vasta nõudmistele. Teisel juhul, kui alumine usaldatavusrada osutub väiksemaks kui T_0 ja ülemine usaldatavusrada suuremaks kui T_0, ei suuda me etteantud usaldatavusega α teha mitte mingisuguseid otsuseid. Võrratus $T_0 < \hat{t}_k$ ei anna meile veel mingisugust õigust tunnistada aparatuur nõudmistele vastavaks.

Kuidas toimida ummikust väljapääsemiseks? Ilmselt peame kitsendama usaldatavusintervalli seni, kuni alumine usaldatavusrada saab suuremaks kui T_0 või, vastupidi, ülemine usaldatavusrada saab väiksemaks kui T_0. Kuid usaldatavusintervalli kitsendamisel ei tohi muutuda usaldatavustõenäosus. Analüüsides r_1 ja r_2 väärtuste tabeleid lisas IV, näeme, et esimene väheneb m suurenemisel, lähenedes 1-le, teine aga suureneb m suurenemisel, lähenedes samuti 1-le. Kuid see ei tähenda mitte midagi muud kui seda, et usaldatavusintervalli kitsendamiseks on vaja jätkata katseid, kuna siis suureneb ka tõrgete arv n (käesoleval juhul on $m = n$) .

Kui lähtuda puhtmatemaatilisest seisukohast siis, mida suurem on katsetatavate eksemplaride arv ja mida pikem on katse, seda parem, s. t. seda kitsam on usaldatavusintervall, seda täpsemalt määrame keskmise tõrketu tööaja. Kuid tehnilised ja majanduslikud kaalutlused loomulikult ei õigusta eksemplaride arvu ning katse kestuse piiramatut suurendamist. Seepärast püütakse suurendada neid muutujaid vaid niipalju, et oleks kindlustatud etteantud usaldatavustõenäosus α.

5.

Reserveerimine

5. 1. Reserveerimise olemus

Elektroonikaaparatuuri kasutamisel võib esineda olukordi, kus tekib vastuolu aparatuuri tehniliste võimaluste ja nende ülesannete vahel, mida aparatuur peab täitma. Võib juhtuda, et aparatuuri tehnilised võimalused tagavad tõrketu töö ajavahemikus $(0, t)$ (me võime nimetada seda ajavahemikku ülesande vältuseks) tõenäosusega $P_1(t)$. Võib ilmneda, et ülesande täitmise tõenäosus peab olema suurem ja võrduma $P_2(t)$; $P_2(t) > P_1(t)$. Töökindlamate detailide kasutamine, kergem elektriline, soojuslik ja mehaaniline režiim, hea konstruktsioon, tootmise igakülgne kontroll jms., mida me teatud mõttes võiksime nimetada klassikalisteks vahenditeks, ei suuda alati tagada ülesande täitmiseks vajalikku aparatuuri töökindlust. Siis tuleb kasutada nn. reserveerimist.

Reserveerimine seisneb funktsionaalselt mittevajalike, nn. reservsüsteemide või reservelementide sissetoomises aparatuuri kõrvuti funktsioonide täitmiseks vajalike põhisüsteemide või põhielementidega. Reservsüsteemid või -elemendid asendavad vastavaid põhisüsteeme või põhielemente, kui tekib tõrge. Reserveerimine võimaldab konstrueerida süsteeme, mille tõrkeintensiivsus on väiksem tema elementide tõrkeintensiivsuste summast. Selles mõttes võiksime kõnelda ka töökindlate süsteemide konstrueerimisest, väikese töökindlusega elementidest.

Reserveerimist pole õige vaadelda kui kõiketervendavat ravimit, mida saab kasutada, olenemata aparatuurist, tema ülesannetest, kasutamisoludest jne. Reserveerimine võib osutuda otstarbekohaseks ning isegi ainuvõimalikuks ühtedes tingimustes ja põhjendamatuks ning isegi

kahjulikuks teistes tingimustes. Reserveerimisega kaasneb aparatuuri keerulisemaks muutumine, kaalu ja gabariitide suurenemine, suurenenud energiatarvidus, aparatuuri kallinemine.

Käesolevas paragrahvis tutvume reserveerimise põhiliste mõistetega; lihtsamad matemaatilised seosed esitame järgmises paragrahvis.

Reserveeritud süsteemid erinevad teineteisest esmajärjekorras reservi lülitusviisilt. Eristatakse alalist reserveerimist ja asendusreserveerimist. Alalise reserveerimise puhul on reservsüsteemid (reservelemendid) põhisüsteemidega (põhielementidega) ühesuguses töörežiimis.

Asendusreserveerimisel asendavad reservsüsteemid või -elemendid põhisüsteeme või -elemente pärast tõrke tekkimist viimastes. Asendusreserveerimisel on vajalikud lülitid tõrkunud süsteemi või elemendi väljalülimiseks ja reservsüsteemi või reservelemendi sisselülimiseks. Ümberlülimine toimub käsitsi või automaatselt. Viimasel juhul räägitakse automaatreserveerimisest.

Asendusreserveerimisel ei ole harilikult vajadust sisend- ja väljundparameetrite häälestamiseks põhisüsteemide või -elementide tõrke tekkimisel ja reservsüsteemide või -elementide sisselülimisel. Asendusreserveerimise eeliste hulka kuulub ka asjaolu, et reservsüsteemid (või reservelemendid olenevalt konkreetsest aparatuurist, mida me vaatleme) võivad sisselülimise momendini olla koormamata või osaliselt koormatud, mis avaldab mõju reserveeritud süsteemi üldisele töökindlusele. Osaliselt koormatud on näiteks aparatuur, kus on sisse lülitatud küttepinged, kuid mitte anoodpinged. Asendusreserveerimisel võib ühte reservelementi kasutada ka mitme ühesuguse põhielemendi asendamiseks tõrke tekkimisel. Siin on tegemist nn. libiseva reserveerimisega.

Kuid teisest küljest osutuvad asendusreserveerimisel vajalikuks aparatuuri töövõimelisuse kontrollseadmed, seadmed tõrke koha otsimiseks ning lülitid. Nende lisaseadmete puudulik töökindlus võib täielikult hävitada asendusreserveerimise eelised.

Alaline reserveerimine on ainuvõimalik siis, kui ei lubata isegi lühikest vaheaega süsteemi või elemendi töös, mis on vajalik ümberlülimiseks põhisüsteemidelt või -elementidelt reservsüsteemidele ja -elementidele.

Lihtsus on teiseks alalise reserveerimise eeliseks (pole vaja lüliteid, kuna tõrkunud süsteemi või elemendi väljalülimist ei toimu). Peamiseks puuduseks tuleb lugeda asjaolu, et reservsüsteemid või -elemendid, olles samas režiimis mis põhisüsteemid või -elemendid, kuluvad ka samal määral. Teiseks: põhielemendi töökõlbmatuks muutumisel muutub reservelementide režiim, mis võib tingida spetsiaalsete skeemide kasutamist, täiendavaid tagasisideahelaid jne. Kolmandaks piirab alalise reserveerimise kasutamist asjaolu, et ühesugune kõrvuti töö on võimalik ainult elektroonikaaparatuuri teatud liikide puhul.

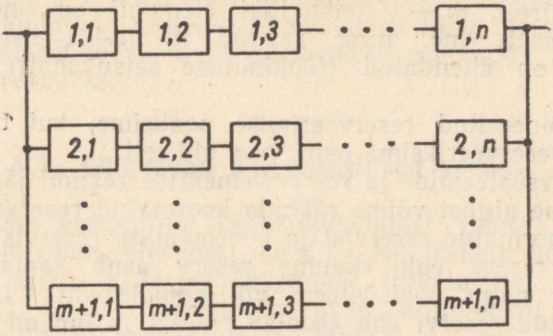
Edasi vaatleme, mida mõistetakse töökindlusteoorias elementide järjestik- ehk jadaühenduse ja paralleel- ehk rööpühenduse all.

Järjestikühenduseks nimetatakse süsteemide (elementide) kogumit, kus tõrke tekkimise vajalikuks ja piisavaks tingimuseks on kas või ühe sellesse kogumisse kuuluva süsteemi (elemendi) tõrge. Näiteks raadiovastuvõtjat võime töökindluse seisukohalt vaadelda süsteemina, kus elementideks on raadiodetailid. Töökindluse seisukohalt on raadiodetailid (või õigemini rõhuv enamik detaile) järjestikku ühendatud, kuna iga raadiodetaili tõrge kutsub (reeglina) esile ka raadiovastuvõtja tõrke. Elektrilisest seisukohast ei või järjestikühendusest muidugi juttugi olla.

Paralleelühenduseks nimetatakse süsteemide (elementide) kogumit, kus tõrke tekkimise vajalikuks ja piisavaks tingimuseks on kõikide sellesse kogumisse kuuluvate süsteemide (elementide) tõrge. Kui ruumis on neli laelampi, võime lugeda neid töökindluse seisukohalt (ja muidugi ka elektriliselt) paralleelselt ühendatuiks, kuna ruum jääb pimedaks alles pärast kõigi nelja lambi läbipõlemist.

Reserveerimist võib liigitada ka: üldine reserveerimine, ositi reserveerimine ja kombineeritud reserveerimine.

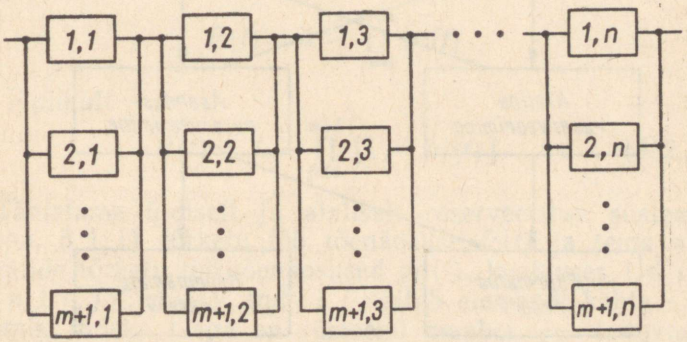
Üldine reserveerimine seisneb süsteemi reserveerimises tervikuna (vt. joon. 5. 1. 1). Põhisüsteem koosneb n elemendist, kus ükskõik missuguse elemendi tõrge kutsub esile ka süsteemi tõrke, s. t. need n elementi on ühendatud järjestikku (töökindluse seisukohalt). Igaüks m reservsüsteemist koosneb samuti n järjestikku (töökindluse seisukohalt) ühendatud elemendist, s. t. reservsüs-



Joon. 5. 1. 1. Üldine reserveerimine

teemi tõrge tekib kas või ühe elemendi tõrkumisel. Põhisüsteem ja m reservsüsteemi on ühendatud (töökindluse seisukohalt) paralleelselt, s. t. reserveeritud süsteem muutub töökõlbmatuks, kui on töökõlbmatuks muutunud kõik $m + 1$ süsteemi.

Ositi reserveerimist on kujutatud joonisel 5. 1. 2. Süsteemi moodustavad jällegi n elementi. Kuid igaüks neist elementidest on eraldi reserveeritud m reservelemendiga, s. t. süsteem muutub töökõlbmatuks, kui on muutunud töökõlbmatuks $m + 1$ esimest liiki elementi või $m + 1$ teist liiki elementi või $m + 1$ kolmandat liiki elementi jne. Võiksime väljenduda ka nii, et $m + 1$ esimest liiki elementi on ühendatud (töökindluse seisukohalt)



Joon. 5. 1. 2. Ositi reserveerimine

paralleelselt, $m+1$ teist liiki elementi on ühendatud paralleelselt jne. ning saadud n $m+1$-elemendilist gruppi on ühendatud (töökindluse seisukohalt) järjestikku.

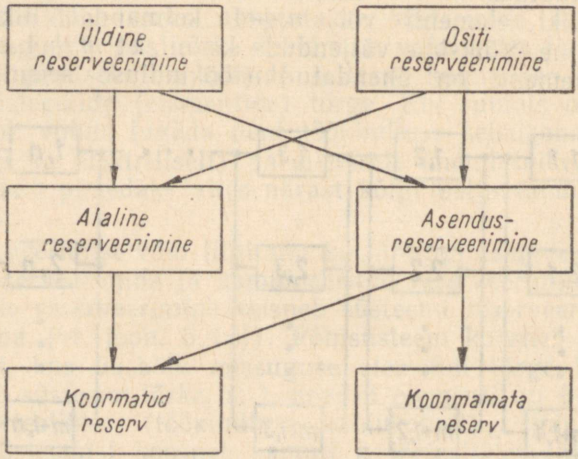
Kombineeritud reserveerimise saaksime, kui osa elemente reserveeriksime ositi, osa üldiselt.

Reservsüsteemide ja reservelementide režiimi järgi enne töötamise algust võime rääkida koormatud reservist, osaliselt koormatud reservist ja koormamata reservist. Koormatud reserv ehk «kuum» reserv asub samasuguses režiimis nagu põhisüsteem või põhielement. Osaliselt koormatud reservi ehk «sooja» reservi režiim on kergem kui koormatud reservi režiim. Koormamata reservi nimetatakse vahel ka «külmaks» reserviks.

Alaline reserveerimine võib olla nii üldine, kui ka ositi reserveerimine. Teisest küljest on alalisel reserveerimisel reserv alati koormatud.

Asendusreserveerimine võib samuti olla nii üldine kui ka ositi reserveerimine. Kuid asendusreserveerimisel on võimalik nii koormatud, osaliselt koormatud kui ka koormamata reserv.

Joonis 5. 1. 3 selgitab võimalikke kombinatsioone. Teostatavad on ainult need kombinatsioonid, mis on näidatud nooltega.



Joon. 5. 1. 3. Seos töökindlusmõistete vahel

Joonistel 5. 1. 1 ja 5. 1. 2 tähistatakse $m+1$-ga paralleelselt töötavate süsteemide või elementide arvu. m on reservsüsteemide või reservelementide arv, mida nimetatakse kordsuseks.

5. 2. Lihtsamad matemaatilised seosed

Vaatleme elementide järjestikühendust (joon. 5. 1. 1). Tähistame i-nda elemendi ($1 \leqslant i \leqslant n$) tõrketu töö tõenäosuse $p_i(t)$ ja järjestikühenduse tõrketu töö tõenäosuse $P(t)$. Siis on järjestikühenduse definitsiooni ja tõenäosuste korrutamise teoreemi järgi

$$P(t) = \prod_{i=1}^{n} p_i(t), \tag{5. 2. 1}$$

s. t. saime tuntud valemi (1. 3. 1).

Vaatleme nüüd elementide paralleelühendust (joon. 5. 1. 2). Tähistame j-nda elemendi ($1 \leqslant j \leqslant m+1$) tõrke tõenäosuse $q_j(t)$ ja paralleelühenduse tõrke tõenäosuse $Q(t)$. Kuna paralleelühenduse definitsiooni järgi toimub temas tõrge ainult siis, kui on toimunud kõikide elementide tõrked, võime tõenäosuste korrutamise teoreemi põhjal kirjutada, et

$$Q(t) = \prod_{j=1}^{m+1} q_j(t).$$

Kuna tõrke tekkimine ja tõrketu töötamine antud ajavahemikus on vastandsündmused, on tõrketu töö tõenäosus

$$P(t) = 1 - \prod_{j=1}^{m+1} q_j(t)$$

ja lõplikult

$$P(t) = 1 - \prod_{j=1}^{m+1} [1 - p_j(t)]. \tag{5. 2. 2}$$

Tähistame üldiselt ja alaliselt reserveeritud süsteemi (joon. 5. 1. 1) tõrketu töö tõenäosuse $P(t)$ ja tema elementide tõrketu töö tõenäosused $p_{ij}(t)$, kusjuures $1 \leqslant i \leqslant n, 1 \leqslant j \leqslant m+1$. Indeks i näitab elemendi kohta süsteemis, indeks j aga on süsteemi number. $j=1$ vastaks põhisüsteemile, $j=2, 3 \ldots m+1$ reservsüsteemidele.

Kuna põhi- ja reservsüsteemides on elemendid ühendatud järjestikku, määratakse j-nda süsteemi tõrketu töö tõenäosus $P_j(t)$ valemiga (5. 2. 1):

$$P_j(t) = \prod_{i=1}^{n} p_{ij}(t).$$

j-nda süsteemi tõrke tõenäosus

$$Q_j(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n} p_{ij}(t).$$

Kuna põhisüsteem ja m reservsüsteemi on ühendatud paralleelselt, s. t. reserveeritud süsteemis tekib tõrge ainult sel juhul, kui on tekkinud tõrge põhisüsteemis ja kõikides m reservsüsteemides, võime kirjutada, et reserveeritud süsteemi tõrke tõenäosus $Q(t)$ võrdub $m+1$ süsteemi tõrke tõenäosuse korrutisega:

$$Q(t) = \prod_{j=1}^{m+1} Q_j(t).$$

Edasi

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - \prod_{j=1}^{m+1} Q_j(t)$$

ja lõplikult

$$P(t) = 1 - \prod_{j=1}^{m+1} [1 - \prod_{i=1}^{n} p_{ij}(t)]. \qquad (5.2.3)$$

Ositi ja alaliselt reserveeritud süsteemi tõrketu töö tõenäosuse arvutamisel lähtume elemendi tõrke tõenäosusest $q_{ij}(t)$. Kuna element i-ndal kohal põhisüsteemis on reserveeritud m korda, s. t. kokku on i-ndal kohal $m+1$ elementi, ja i-ndal kohal tekib tõrge ainult juhul, kui kõik $m+1$ elementi on töökõlbmatuks muutunud, siis

$$Q_i(t) = \prod_{j=1}^{m+1} q_{ij}(t).$$

$Q_i(t)$ on tõrke tekkimise tõenäosus i-ndal kohal. Kuna

$$q_{ij}(t) = 1 - p_{ij}(t)$$

ja

$$P_i(t) = 1 - Q_i(t),$$

siis

$$P_i(t) = 1 - \prod_{j=1}^{m+1} [1 - p_{ij}(t)].$$

n gruppi m korda reserveeritud elementi on ühendatud järjestikku ning siit

$$P(t) = \prod_{i=1}^{n} \{1 - \prod_{j=1}^{m+1} [1 - p_{ij}(t)]\}. \qquad (5.2.4)$$

Kui kõik elemendid on töökindluse seisukohalt ühesugused ja $p_{ij}(t) = p(t)$, siis valemid (5.2.3) ja (5.2.4) lihtsustuvad. Üldise reserveerimise jaoks saame, et

$$P_{ü}(t) = 1 - [1 - p^n(t)]^{m+1} \qquad (5.2.5)$$

ja ositi reserveerimise jaoks

$$P_o(t) = \{1 - [1 - p(t)]^{m+1}\}^n. \qquad (5.2.6)$$

Võrdleme tõrketu töö tõenäosust üldisel ja ositi reserveerimisel (tuletame meelde, et meil on tegemist alalise reserveerimisega ning järelikult koormatud reserviga). Teeme seda lihtsa näite abil. Olgu $n = 2$ ja $m = 1$, s. t. süsteem koosneb kahest järjestikku ühendatud elemendist ja reserveerimine on ühekordne. Üldisel reserveerimisel (me tähistame $p(t) = p$)

$$P_{ü}(t) = 1 - (1 - p^2)^2 = 2p^2 - p^4$$

ning ositi reserveerimisel

$$P_o(t) = [1 - (1 - p)^2]^2 = 4p^2 - 4p^3 + p^4 =$$
$$= (2p^2 - p^4) + 2p^2 - 4p^3 + 2p^4 =$$
$$= (2p^2 - p^4) + 2p^2(1 - p)^2.$$

Viimasest avaldisest järeldub, et

$$P_o(t) = P_{ü}(t) + 2p^2(1 - p)^2.$$

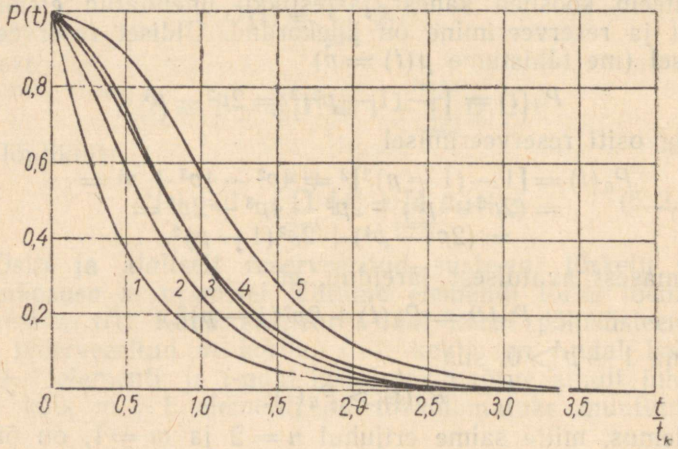
Kuna $1 - p > 0$, siis

$$P_o(t) > P_{ü}(t).$$

Tulemus, mille saime erijuhul $n = 2$ ja $m = 1$, on õige igasuguste n ja m väärtuste puhul. Näeme, et ositi reserveerimine tagab suurema tõrketu töö tõenäosuse kui üldine reserveerimine. Tõepoolest, kui on tegemist m-kordse üldise reserveerimisega, siis on küllalt $m + 1$ tõrkest, et reserveeritud süsteem lakkaks töötamast. Kui igat elementi ositi reserveeritakse m-korda, on ka siin elementide tõrgete minimaalne arv, mille tagajärjel tekib reserveeritud süsteemi tõrge, $m + 1$. Kuid on vähe tõenäoline, et tõrked tekiksid ainult ühe elemendi reservelementides. Kui tekkis tõrge elemendis numbriga i, siis on

tõenäolisem, et järgmine tõrge tekib mõnes teises elemendis numbriga k, mitte aga i-nda põhielemendi reserv-elemendis. Niimoodi suureneb elementide tõrgete arv, mis veel ei põhjusta reserveeritud süsteemi tõrget.

Joonisel 5. 2. 1 näitab kõver *1* kahe järjestikku ühendatud elemendi ($n = 2$, $m = 0$) tõrketu töö tõenäosust $P(t)$ sõltuvalt ajast suhtelistes ühikutes ($t_k = \frac{1}{\lambda}$ on elemendi keskmine tõrketu tööaeg, $\lambda = \text{const}$). Kõver *2* vastab ühekordselt üldiselt ($n = 2$, $m = 1$) ja kõver *3* kahekordselt üldiselt ($n = 2$, $m = 2$) reserveeritud süsteemile. Kõver *4* vastab ühekordselt ositi ($n = 2$, $m = 1$) ja kõver *5* kahekordselt ositi ($n = 2$, $m = 2$) reserveeritud süsteemile. Näeme, et ühesuguse reserveerimiskordsuse juures asub ositi reserveerimise kõver kõrgemal kui üldise reserveerimise kõver.



Joon. 5. 2. 1. Alalist reserveerimist iseloomustavad kõverad

Lahendame järgmise ülesande. Olgu meil $m + 1$ paralleelselt ühendatud elementi, teiste sõnadega, m-kordselt reserveeritud element. Reserveerimine on siin alaline ja reserv koormatud. Olgu elementide tõrkeintensiivsus konstantne ja võrdne λ. Leiame paralleelühenduse keskmise tõrketu tööaja T_k.

Kasutame valemit (5. 2. 2) ja seost $p(t) = \exp[-\lambda t]$. Valemi (1. 1. 14) põhjal võime kirjutada:

$$T_{k,\,m+1} = \int_0^\infty \{1 - [1 - \exp[-\lambda t]]^{m+1}\}\,dt.$$

Moodustame vahe $T_{k,\,m+1} - T_{k,\,m}$:

$$T_{k,\,m+1} + 1 - T_{k,\,m} = \int_0^\infty [1 - \exp[-\lambda t]]^m \exp[-\lambda t]\,dt.$$

Kasutades integraali arvutamisel asendust $y = \exp[-\lambda t]$, võime leida, et

$$T_{k,\,m+1} - T_{k,\,m} = \frac{1}{\lambda(m+1)}.$$

Asetades sellesse avaldisse järjekorras m, $m-1$, $m-2 \ldots 2, 1, 0$, võime leida, et

$$T_{k,\,m+1} = \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \ldots + \frac{1}{m+1}\right) t_k, \qquad (5.2.7)$$

kus $t_k = \frac{1}{\lambda}$ on ühe elemendi keskmine tõrketu tööaeg.

Vaatleme nüüd lihtsamat asendusreserveerimist.

Olgu meil m-kordselt reserveeritud element, kusjuures reservelement lülitatakse põhielemendi asemele alles tõrke tekkimisel. Kuni selle momendini on reservelement koormamata olukorras. Eeldame, et elementide tõrkeintensiivsus λ on konstantne. Samuti eeldame, et reservelement lülitatakse tõrkunud elemendi asemele momentaanselt.

Olgu $m = 1$. Tähistame põhielemendi tõrke tekkimise momendi t_1. Reservelemendi tõrke tekkimise moment on t_2, kusjuures nii t_1 kui ka t_2 on juhuslikud muutujad. Põhielemendi tõrke tõenäosustihedus on vastavalt valemile (1. 2. 2)

$$f_1(t_1) = \lambda \exp[-\lambda t_1]$$

ja reservelemendi tõrke tõenäosustihedus

$$f_2(t_2 - t_1) = \lambda \exp[-\lambda(t_2 - t_1)]$$

(reservelement lülitatakse sisse momendil t_1). Tõenäosus, et põhielement muutub töökõlbmatuks vahemikus $(t_1, t_1 + dt_1)$, on

$$\lambda \exp[-\lambda t_1]\,dt_1.$$

Tõenäosus, et reservelemendi tõrge toimub vahemikus $(t_2, t_2 + \mathrm{d}t_2)$ eeldusel, et põhielemendi tõrge tekkis momendil t_1, on

$$\lambda \exp\left[-\lambda(t_2 - t_1)\right] \mathrm{d}t_2.$$

Tõenäosus, et reservelemendi tõrge tekib vahemikus $(t_2, t_2 + \mathrm{d}t_2)$ eeldusel, et põhielemendi tõrge toimus vahemikus $(t_1, t_1 + \mathrm{d}t_1)$, on

$$\lambda \exp\left[-\lambda t_1\right] \mathrm{d}t_1 \lambda \exp\left[-\lambda(t_2 - t_1)\right] \mathrm{d}t_2 = \\ = \lambda^2 \exp\left[-\lambda t_2\right] \mathrm{d}t_1 \, \mathrm{d}t_2.$$

Tõenäosus, et reservelemendi tõrge tekib vahemikus $(t_2, t_2 + \mathrm{d}t_2)$ ja ükskõik millal vahemikus $(0, t_2)$ on tekkinud põhielemendi tõrge, määratakse integraaliga

$$\mathrm{d}t_2 \int_0^{t_2} \lambda^2 \exp\left[-\lambda t_2\right] \mathrm{d}t_1 = \lambda^2 \exp\left[-\lambda t_2\right] \mathrm{d}t_2 \int_0^{t_2} \mathrm{d}t_1 = \\ = \lambda^2 t_2 \exp\left[-\lambda t_2\right] \mathrm{d}t_2.$$

Nagu näeme sellest valemist, kujutab $\lambda^2 t_2 \exp\left[-\lambda t_2\right]$ endast reserveeritud süsteemi tõrke tekkimise tõenäosustihedust. Tõrketu töö tõenäosuse saaksime integreerides:

$$P(t) = \int_t^\infty \lambda^2 t_2 \exp\left[-\lambda t_2\right] \mathrm{d}t_2 = \\ = -\lambda t_2 \exp\left[-\lambda t_2\right] \Big|_t^\infty + \int_t^\infty \lambda \exp\left[-\lambda t_2\right] \mathrm{d}t_2 = \\ = \lambda t \exp\left[-\lambda t\right] + \exp\left[-\lambda t\right] = \\ = \exp\left[-\lambda t\right](1 + \lambda t).$$

Siit on kerge leida ühekordselt reserveeritud süsteemi keskmist tõrketut tööaega:

$$T_{k,2} = \int_0^\infty \exp\left[-\lambda t\right] \mathrm{d}t + \int_0^\infty \lambda t \exp\left[-\lambda t\right] \mathrm{d}t = \\ = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\lambda} = \frac{2}{\lambda} = 2t_k,$$

kus t_k on elemendi keskmine tõrketu tööaeg.

Olgu $m = 2$, s. t. meil on põhielement ja kaks reservelementi. Põhielemendi tõrke tõenäosustihedus

$$f_1(t_1) = \lambda \exp\left[-\lambda t_1\right],$$

esimese reservelemendi tõrke tõenäosustihedus

$$f_2(t_2 - t_1) = \lambda \exp\left[-\lambda(t_2 - t_1)\right]$$

ja teise reservelemendi tõrke tekkimise tõenäosustihedus

$$f_3(t_3 - t_2) = \lambda \exp\left[-\lambda(t_3 - t_2)\right],$$

kus t_1, t_2 ja t_3 on tõrke tekkimise momendid. t_1, t_2 ja t_3 on juhuslikud muutujad. Tõenäosus, et teise reservelemendi tõrge tekib vahemikus $(t_3,\ t_3 + \mathrm{d}t_3)$ eeldusel, et esimese reservelemendi tõrge tekkis vahemikus $(t_2,\ t_2 + \mathrm{d}t_2)$ ja põhielemendi tõrge ajavahemikus $(t_1,\ t_1 + \mathrm{d}t_1)$ on

$$\lambda \exp\left[-\lambda t_1\right] \mathrm{d}t_1 \lambda \exp\left[-\lambda(t_2 - t_1)\right] \cdot$$
$$\cdot\, \mathrm{d}t_2 \lambda \exp\left[-\lambda(t_3 - t_2)\right] \mathrm{d}t_3 = \lambda^3 \exp\left[-\lambda t_3\right] \mathrm{d}t_1\, \mathrm{d}t_2\, \mathrm{d}t_3$$

(loomulikult on $t_1 < t_2 < t_3$). Kui tahame leida, milline on tõenäosus, et teise reservelemendi ja järelikult ka kogu reserveeritud süsteemi tõrge tekib ajavahemikus $(t_3,\ t_3 + \mathrm{d}t_3)$, ükskõik kus asetsevad seejuures t_1 ja t_2, peame viimast avaldist integreerima t_1 järgi 0-st kuni t_2-ni ja t_2 järgi 0-st kuni t_3-ni;

$$\mathrm{d}t_3 \int_0^{t_3} \left[\int_0^{t_2} \lambda^3 \exp\left[-\lambda t_3\right] \mathrm{d}t_1 \right] \mathrm{d}t_2 =$$

$$= \lambda^3 \exp\left[-\lambda t_3\right] \mathrm{d}t_3 \int_0^{t_3} \left[\int_0^{t_2} \mathrm{d}t_1 \right] \mathrm{d}t_2 =$$

$$= \frac{\lambda^3 t_3^2}{2} \exp\left[-\lambda t_3\right] \mathrm{d}t_3.$$

Integreerides viimast avaldist t-st kuni ∞-ni, saame tõrketu töö tõenäosuse funktsioonina ajast:

$$P(t) = \int_t^{\infty} \frac{\lambda^3 t_3^2}{2} \exp\left[-\lambda t_3\right] \mathrm{d}t_3 = \exp\left[-\lambda t\right] +$$

$$+ \lambda t \exp\left[-\lambda t\right] + \frac{(\lambda t)^2}{2} \exp\left[-\lambda t\right] =$$

$$= \exp\left[-\lambda t\right] \left[1 + \lambda t + \frac{(\lambda t^2)}{2} \right].$$

Kahekordselt reserveeritud süsteemi keskmine tõrketu tööaeg

$$T_{k,3} = \int_0^\infty \exp[-\lambda t]\left[1 + \lambda t + \frac{(\lambda t^2)}{2}\right] dt =$$

$$= \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\lambda} = \frac{3}{\lambda} = 3\, t_k.$$

Ei ole raske üldistada neid tulemusi igasuguse m väärtuse jaoks. Võib näidata, et kui meil on tegemist m-kordse ositi reserveerimisega, s. t. kui meil on $m+1$ elementi, avaldub tõrketu töö tõenäosus valemiga

$$P(t) = \exp[-\lambda t]\left[1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \ldots + \right.$$

$$\left. + \frac{(\lambda t)^m}{m!}\right]. \qquad (5.2.8)$$

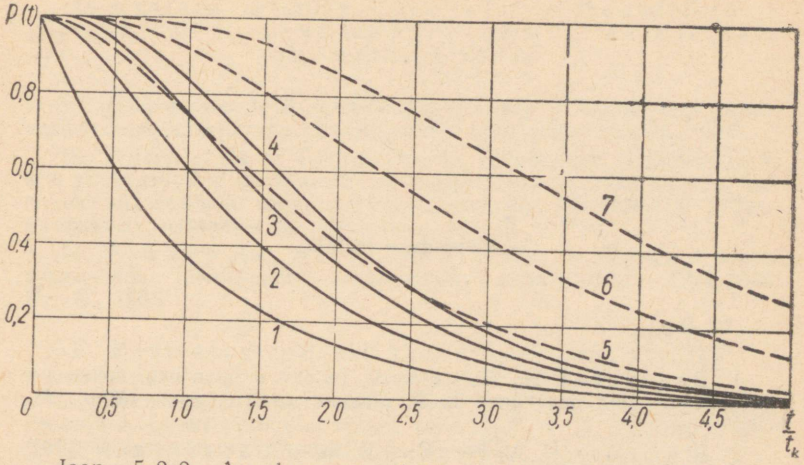
Keskmine tõrketu tööaeg määratakse valemiga

$$T_{k,m+1} = \frac{m+1}{\lambda} = (m+1)t_k. \qquad (5.2.9)$$

Viimase valemi füüsikalist sisu ei ole raske mõista. Tõepoolest, meil on põhielement ja m reservelementi. Põhielemendi tõrke puhul asendatakse ta esimese reservelemendiga, see omakorda teise reservelemendiga jne. Igaüks neist elementidest töötab keskmiselt t_k tundi. Tähendab möödub keskmiselt $m+1$ korda rohkem aega, enne kui reserveeritud süsteem muutub töökõlbmatuks.

Kui võrdleme valemeid (5.2.7) ja (5.2.9), näeme, et keskmine tõrketu tööaeg asendusreserveerimisel on tunduvalt suurem alalise reserveerimise keskmisest tõrketust tööajast sama reserveerimiskordsuse juures. Analoogilisele järeldusele tuleme ka joonist 5.2.2 vaadates. Kõver *1* näitab reserveerimata elemendi tõrketu töö tõenäosust sõltuvalt ajast (eeldame, et elemendi tõrkeintensiivsus λ on konstantne, $t_k = \frac{1}{\lambda}$). Kõverad *2*, *3* ja *4* vastavad ühe-, kahe- ja kolmekordselt alaliselt reserveeritud elementidele, kõverad *5*, *6* ja *7* ühe-, kahe- ja kolmekordsele asendusreserveerimisele. Näeme, et ühesuguse reserveerimiskordsuse juures on asendusreserveerimine teoreetiliselt tunduvalt efektiivsem kui alaline reserveerimine.

Kuid ei tohi unustada, et asendusreserveerimise praktilisel rakendamisel on vajalikud seadmed süsteemi töövõime kontrollimiseks ja tõrke õigeaegseks konstateeri-



Joon. 5. 2. 2. Asendusreserveerimist iseloomustavad kõverad

miseks, tõrkunud elemendi leidmiseks ja väljalülimiseks ning reservelemendi sisselülimiseks. Nagu kõigi tehniliste toodete juures nii on ka kontrollaparatuuri ja lülitite juures võimatu garanteerida 100%-list tõrketut töötamist. Eelnevas käsitluses me aga eeldasime, et ümberlülimine põhielemendilt reservelemendile toimub silmapilkselt ja lülimisel ei esine tõrkeid. Arvestades tõrke võimalusi lülitites, väheneb asendusreserveerimisel saavutatud efekt, võrreldes alalise reserveerimisega.

Kirjanduse loetelu

A. Õpikud

1. Базовский И., Надежность. Теория и практика, перевод с английского под редакцией Б. Р. Левина, издательство «Мир», М., 1965.

2. Шишонок Н. А., Репкин В. Ф. и Барвинский Л. Л., Основы теории надежности и эксплуатации радиоэлектронной техники, издательство «Советское радио», М., 1964.

3. Калабро С. Р., Принципы и практические вопросы надежности, перевод с английского под редакцией доктора техн. наук проф. Д. Ю. Панова, издательство «Машиностроение», Москва, 1966.

B. Põhjalikumad monograafiad

3а. Кибернетику на службу коммунизма, том 2 (Теория надежности и теория массового обслуживания), сборник статей под редакцией А. И. Берга, Н. Г. Бруевича и Б. В. Гнеденко, издательство «Энергия», М.—Л., 1964.

4. Ллойд Д. К. и Липов М., Надежность: организация исследования, методы, математический аппарат, перевод с английского под редакцией Н. П. Бусленко, издательство «Советское радио», М., 1964.

C. Matemaatilise kallakuga raamatud

5. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К. и Соловьев А. Д., Математические методы в теории надежности, издательство «Наука», М., 1965.

6. Коуден Д., Статистические методы контроля качества, перевод с английского под редакцией Б. Р. Левина, Физматгиз, М., 1961.

7. Месяцев П. П., Применение теории вероятностей и математической статистики при конструировании и производстве радиоаппаратуры, Оборонгиз, М., 1958.

8. Шор Я. Б., Статистические методы анализа и контроля качества и надежности, издательство «Советское радио», М., 1962.

D. Väliste klimaatiliste ja mehaaniliste tegurite mõju raadioaparatuurile, detailidele ja materjalidele

9. Астафьев А. В., Окружающая среда и надежность радиотехнической аппаратуры, издательство «Энергия», М.—Л., 1965.

10. Даммер А. и Гриффин Б., Испытание радиоэлектронной аппаратуры и материалов на воздействие климатических и механических условий, перевод с английского под редакцией Б. Е. Бердичевского, издательство «Энергия», М.—Л., 1965.

11. Даммер Дж., Брунетти К. и Ли Л., Расчет и конструирование электронной аппаратуры, издательство «Энергия», М.—Л., 1964.

E. Raamatud detailide töökindluse kohta

12. Надежность полупроводниковых устройств, сборник статей, перевод с английского под общей редакцией А. А. Маслова, издательство иностранной литературы, М., 1963.

13. Пароль Н. В., Надежность приемно-усилительных ламп, издательство «Советское радио», М., 1964.

14. Хинней К. и Уолш К., Радиодетали и проблема их надежности, перевод с английского под редакцией Б. М. Тареева, издательство «Советское Радио», М., 1960.

F. Üksikutele probleemidele pühendatud ja muud raamatud

15. Бородачев Н. А., Основные вопросы теории точности производства, издательство АН СССР, М.—Л., 1950.

16. Дружинин Г. В., Надежность устройств автоматики, издательство «Энергия», М.—Л., 1964.

17. Гусев В. П., Фомин А. В., Кунявский Г. М., Обичкин Ю. Г., Молостов Е. А., Назаров А. С., Сахаров М. А., Гребнев А. К., Расчет электрических допусков радиоэлектронной аппаратуры, издательство «Советское радио», М., 1963.

18. Маликов И. М., Половко А. М., Романов А. Н., Чукреев П. А., Основы теории и расчета надежности, Судпромгиз, Л., 1960.

19. Месяцев П. П., Надежность производства электронновычислительных машин, Машгиз, М., 1963.

20. Надежность наземного радиоэлектронного оборудования, перевод с английского под редакцией Н. М. Шулейкина, издательство «Советское Радио», М., 1957.

21. Половко А. М., Основы теории надежности, издательство «Наука», 1964.

22. Ремонтопригодность радиоэлектронной аппаратуры, сборник докладов, перевод с английского под редакцией О. Ф. Пославского, издательство «Советское радио», М., 1964.

23. Сандлер, Дж., Техника надежности систем, перевод с английского А. Л. Райкина, издательство «Наука», Москва, 1966 г.
24. Хевиленд Р., Инженерная надежность и расчет на долговечность, перевод с английского Б. А. Чумаченко под редакцией Г. Н. Баласанова, издательство «Энергия», Москва—Ленинград, 1966.
25. Сборник Комитета Научно-технических терминов и Института Радиоэлектроники Академии наук СССР. Теория надежности в области радиоэлектроники. Терминология. Выпуск 60. Издательство АН СССР, М., 1962.
26. Надежность технических систем и изделий. Основные понятия. Терминология. Сборник Комитета Научно-технической терминологии. Выпуск 67а. Издательство АН СССР «Наука», М., 1965.
27. Вопросы надежности радиоэлектронной аппаратуры, сборник статей, перевод с английского под редакцией И. И. Морозова, Издательство «Советское радио», М., 1959.
28. Проблемы надежности радиоэлектронной аппаратуры, сборник докладов пятого национального симпозиума США, перевод с английского под редакцией Б. Е. Бердичевского, Оборонгиз, М., 1960.
29. Белов Ф. И. и Соловейчик Ф. С., Вопросы надежности радиоэлектронной аппаратуры, Госэнергоиздат, М.—Л., 1961.

Funktsiooni $y = \exp[-x]$ väärtuste tabel

x	y	x	y	x	y
0,00	1,0000	0,40	0,6703	0,80	0,4493
01	0,9900	41	0,6637	81	0,4449
02	0,9802	42	0,6570	82	0,4404
03	0,9704	43	0,6505	83	0,4360
04	0,9608	44	0,6440	84	0,4317
05	0,9512	45	0,6376	85	0,4274
06	0,9418	46	0,6313	86	0,4232
07	0,9324	47	0,6250	87	0,4190
08	0,9231	48	0,6188	88	0,4148
09	0,9139	49	0,6126	89	0,4107
0,10	0,9048	0,50	0,6065	0,90	0,4066
11	0,8958	51	0,6005	91	0,4025
12	0,8869	52	0,5945	92	0,3985
13	0,8781	53	0,5886	93	0,3946
14	0,8694	54	0,5827	94	0,3906
15	0,8607	55	0,5769	95	0,3867
16	0,8521	56	0,5712	96	0,3829
17	0,8437	57	0,5655	97	0,3791
18	0,8353	58	0,5599	98	0,3753
19	0,8270	59	0,5543	99	0,3716
0,20	0,8187	0,60	0,5488	1,00	0,3679
21	0,8106	61	0,5434	01	0,3642
22	0,8025	62	0,5379	02	0,3606
23	0,7945	63	0,5326	03	0,3570
24	0,7866	64	0,5273	04	0,3535
25	0,7788	65	0,5220	05	0,3499
26	0,7711	66	0,5169	06	0,3465
27	0,7634	67	0,5117	07	0,3430
28	0,7558	68	0,5066	08	0,3396
29	0,7483	69	0,5016	09	0,3362
0,30	0,7408	0,70	0,4966	1,10	0,3329
31	0,7334	71	0,4916	11	0,3296
32	0,7261	72	0,4868	12	0,3263
33	0,7189	73	0,4819	13	0,3230
34	0,7118	74	0,4771	14	0,3198
35	0,7047	75	0,4724	15	0,3166
36	0,6977	76	0,4677	16	0,3135
37	0,6907	77	0,4630	17	0,3104
38	0,6839	78	0,4584	18	0,3073
39	0,6771	79	0,4538	19	0,3042

x	y	x	y	x	y
1,20	0,3012	1,60	0,2019	2,00	0,1353
21	0,2982	61	0,1999	01	0,1340
22	0,2952	62	0,1979	02	0,1327
23	0,2923	63	0,1959	03	0,1313
24	0,2894	64	0,1940	04	0,1300
25	0,2865	65	0,1920	05	0,1287
26	0,2837	66	0,1901	06	0,1275
27	0,2808	67	0,1882	07	0,1262
28	0,2780	68	0,1864	08	0,1249
29	0,2753	69	0,1845	09	0,1237
1,30	0,2725	1,70	0,1827	2,10	0,1225
31	0,2698	71	0,1809	11	0,1212
32	0,2671	72	0,1791	12	0,1200
33	0,2645	73	0,1773	13	0,1188
34	0,2618	74	0,1755	14	0,1177
35	0,2592	75	0,1738	15	0,1165
36	0,2567	76	0,1720	16	0,1153
37	0,2541	77	0,1703	17	0,1142
38	0,2516	78	0,1686	18	0,1130
39	0,2491	79	0,1670	19	0,1119
1,40	0,2466	1,80	0,1653	2,20	0,1108
41	0,2441	81	0,1637	21	0,1097
42	0,2417	82	0,1620	22	0,1086
43	0,2393	83	0,1604	23	0,1075
44	0,2369	84	0,1588	24	0,1065
45	0,2346	85	0,1572	25	0,1054
46	0,2322	86	0,1557	26	0,1044
47	0,2299	87	0,1541	27	0,1033
48	0,2276	88	0,1526	28	0,1023
49	0,2254	89	0,1511	29	0,1013
1,50	0,2231	1,90	0,1496	2,30	0,10026
51	0,2209	91	0,1481	31	0,09926
52	0,2187	92	0,1466	32	0,09827
53	0,2165	93	0,1451	33	0,09730
54	0,2144	94	0,1437	34	0,09623
55	0,2122	95	0,1423	35	0,09537
56	0,2101	96	0,1409	36	0,09442
57	0,2080	97	0,1395	37	0,09348
58	0,2060	98	0,1381	38	0,09255
59	0,2039	99	0,1367	39	0,09163

x	y	x	y	x	y
2,40	0,09072	2,80	0,06081	3,20	0,04076
41	0,08982	81	0,06020	21	0,04036
42	0,08892	82	0,05961	22	0,03996
43	0,08804	83	0,05901	23	0,03956
44	0,08716	84	0,05843	24	0,03916
45	0,08629	85	0,05784	25	0,03877
46	0,08543	86	0,05727	26	0,03839
47	0,08458	87	0,05670	27	0,03801
48	0,08374	88	0,05613	28	0,03763
49	0,08291	89	0,05558	29	0,03725
2,50	0,08208	2,90	0,05502	3,30	0,03688
51	0,08127	91	0,05448	31	0,03652
52	0,08046	92	0,05393	32	0,03615
53	0,07966	93	0,05340	33	0,03579
54	0,07887	94	0,05287	34	0,03544
55	0,07808	95	0,05234	35	0,03508
56	0,07730	96	0,05182	36	0,03474
57	0,07654	97	0,05130	37	0,03439
58	0,07577	98	0,05079	38	0,03405
59	0,07502	99	0,05029	39	0,03371
2,60	0,07427	3,00	0,04979	3,40	0,03337
61	0,07353	01	0,04929	41	0,03304
62	0,07280	02	0,04880	42	0,03271
63	0,07208	03	0,04832	43	0,03239
64	0,07136	04	0,04783	44	0,03206
65	0,07065	05	0,04736	45	0,03175
66	0,06995	06	0,04689	46	0,03143
67	0,06925	07	0,04642	47	0,03112
68	0,06856	08	0,04596	48	0,03081
69	0,06788	09	0,04550	49	0,03050
2,70	0,06721	3,10	0,04505	3,50	0,03020
71	0,06654	11	0,04460	51	0,02990
72	0,06587	12	0,04416	52	0,02960
73	0,06522	13	0,04372	53	0,02930
74	0,06457	14	0,04328	54	0,02901
75	0,06393	15	0,04285	55	0,02872
76	0,06329	16	0,04243	56	0,02844
77	0,06266	17	0,04200	57	0,02816
78	0,06204	18	0,04159	58	0,02788
79	0,06142	19	0,04117	59	0,02760

x	y	x	y
3,60	0,02732	3,80	0,02237
61	0,02705	81	0,02215
62	0,02678	82	0,02193
63	0,02652	83	0,02171
64	0,02625	84	0,02149
65	0,02599	85	0,02128
66	0,02573	86	0,02107
67	0,02548	87	0,02086
68	0,02522	88	0,02065
69	0,02497	89	0,02045
3,70	0,02472	3,90	0,02024
71	0,02448	91	0,02004
72	0,02423	92	0,01984
73	0,02399	93	0,01964
74	0,02375	94	0,01945
75	0,02352	95	0,01925
76	0,02328	96	0,01906
77	0,02305	97	0,01887
78	0,02282	98	0,01869
79	0,02260	99	0,01850

Funktsiooni $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} \exp\left[-\frac{u^2}{2}\right] du$ **väärtuste tabel**

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
—4,0	0,0000	—2,0	0,0228	0,0	0,5000	2,0	0,9772
—3,9	0,0000	—1,9	0,0288	0,1	0,5398	2,1	0,9821
—3,8	0,0001	—1,8	0,0359	0,2	0,5793	2,2	0,9861
—3,7	0,0001	—1,7	0,0446	0,3	0,6179	2,3	0,9893
—3,6	0,0002	—1,6	0,0548	0,4	0,6554	2,4	0,9918
—3,5	0,0002	—1,5	0,0668	0,5	0,6915	2,5	0,9938
—3,4	0,0003	—1,4	0,0808	0,6	0,7257	2,6	0,9953
—3,3	0,0005	—1,3	0,0968	0,7	0,7580	2,7	0,9965
—3,2	0,0007	—1,2	0,1151	0,8	0,7881	2,8	0,9974
—3,1	0,0010	—1,1	0,1357	0,9	0,8159	2,9	0,9981
—3,0	0,0013	—1,0	0,1587	1,0	0,8413	3,0	0,9987
—2,9	0,0019	—0,9	0,1841	1,1	0,8643	3,1	0,9990
—2,8	0,0026	—0,8	0,2119	1,2	0,8849	3,2	0,9993
—2,7	0,0035	—0,7	0,2420	1,3	0,9032	3,3	0,9995
—2,6	0,0047	—0,6	0,2743	1,4	0,9192	3,4	0,9997
—2,5	0,0062	—0,5	0,3085	1,5	0,9332	3,5	0,9998
—2,4	0,0082	—0,4	0,3446	1,6	0,9452	3,6	0,9998
—2,3	0,0107	—0,3	0,3821	1,7	0,9554	3,7	0,9999
—2,2	0,0139	—0,2	0,4207	1,8	0,9641	3,8	0,9999
—2,1	0,0179	—0,1	0,4602	1,9	0,9713	3,9	1,0000

Funktsiooni $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} \exp\left[-\frac{u^2}{2}\right] du$ pöördfunktsiooni väärtuste tabel

$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x
0,00	$-\infty$	0,25	—0,674	0,50	0,000	0,75	0,674
0,01	—2,326	0,26	—0,643	0,51	0,025	0,76	0,706
0,02	—2,054	0,27	—0,613	0,52	0,050	0,77	0,739
0,03	—1,881	0,28	—0,583	0,53	0,075	0,78	0,772
0,04	—1,751	0,29	—0,553	0,54	0,100	0,79	0,806
0,05	—1,645	0,30	—0,524	0,55	0,126	0,80	0,842
0,06	—1,555	0,31	—0,496	0,56	0,151	0,81	0,878
0,07	—1,476	0,32	—0,468	0,57	0,176	0,82	0,915
0,08	—1,405	0,33	—0,440	0,58	0,202	0,83	0,954
0,09	—1,341	0,34	—0,412	0,59	0,228	0,84	0,994
0,10	—1,282	0,35	—0,385	0,60	0,253	0,85	1,036
0,11	—1,227	0,36	—0,358	0,61	0,279	0,86	1,080
0,12	—1,175	0,37	—0,332	0,62	0,305	0,87	1,126
0,13	—1,126	0,38	—0,305	0,63	0,332	0,88	1,175
0,14	—1,080	0,39	—0,279	0,64	0,358	0,89	1,227
0,15	—1,036	0,40	—0,253	0,65	0,385	0,90	1,282
0,16	—0,994	0,41	—0,228	0,66	0,412	0,91	1,341
0,17	—0,954	0,42	—0,202	0,67	0,440	0,92	1,405
0,18	—0,915	0,43	—0,176	0,68	0,468	0,93	1,476
0,19	—0,878	0,44	—0,151	0,69	0,496	0,94	1,555
0,20	—0,842	0,45	—0,126	0,70	0,524	0,95	1,645
0,21	—0,806	0,46	—0,100	0,71	0,553	0,96	1,751
0,22	—0,772	0,47	—0,075	0,72	0,583	0,97	1,881
0,23	—0,739	0,48	—0,050	0,73	0,613	0,98	2,054
0,24	—0,706	0,49	—0,025	0,74	0,643	0,99	2,326
0,005	—2,576	0,001	—3,090	0,0005	—3,291	0,0001	—3,719
0,995	2,576	0,999	3,090	0,9995	3,291	0,9999	3,719

Tegurid usaldatavusradade määramiseks Poissoni jaotuse, gammajaotuse ja eksponentjaotuse korral

m	α'					
	0,999	0,990	0,975	0,950	0,900	0,800
			Tegur r_1			
1	1000	100	40	19,5	9,50	4,48
2	44,0	13,5	8,26	5,63	3,77	2,42
3	15,7	6,88	4,84	3,66	2,73	1,95
4	9,33	4,85	3,67	2,93	2,29	1,74
5	6,76	3,91	3,08	2,54	2,05	1,62
6	5,43	3,36	2,73	2,29	1,90	1,54
8	4,06	2,75	2,31	2,01	1,72	1,43
10	3,38	2,42	2,08	1,83	1,61	1,37
15	2,59	2,01	1,78	1,62	1,46	1,28
20	2,23	1,81	1,64	1,51	1,37	1,24
25	2,02	1,68	1,55	1,44	1,33	1,21
30	1,89	1,60	1,48	1,39	1,29	1,18
40	1,72	1,50	1,40	1,32	1,24	1,16
50	1,61	1,43	1,35	1,28	1,21	1,14
60	1,56	1,38	1,31	1,25	1,19	1,12
80	1,47	1,32	1,26	1,21	1,16	1,10
100	1,40	1,28	1,23	1,19	1,14	1,09
150	1,31	1,22	1,18	1,15	1,12	1,07
200	1,26	1,19	1,16	1,13	1,10	1,06
250	1,23	1,17	1,14	1,11	1,09	1,06
300	1,21	1,15	1,12	1,10	1,08	1,05
400	1,18	1,13	1,11	1,09	1,07	1,04
500	1,16	1,11	1,09	1,08	1,06	1,04
600	1,14	1,10	1,08	1,07	1,05	1,04
800	1,12	1,09	1,07	1,06	1,05	1,03
1000	1,11	1,08	1,06	1,05	1,04	1,03
			Tegur r_2			
1	0,11	0,15	0,18	0,21	0,26	0,33
2	0,18	0,24	0,28	0,32	0,38	0,47
3	0,23	0,30	0,34	0,39	0,45	0,55
4	0,27	0,35	0,39	0,44	0,50	0,60
5	0,30	0,38	0,43	0,48	0,54	0,63

m	α'					
	0,999	0,990	0,975	0,950	0,900	0,800
6	0,33	0,41	0,46	0,51	0,57	0,66
8	0,38	0,46	0,51	0,55	0,62	0,70
10	0,41	0,50	0,54	0,59	0,65	0,73
15	0,48	0,56	0,60	0,65	0,70	0,78
20	0,53	0,60	0,65	0,69	0,74	0,81
25	0,56	0,64	0,68	0,72	0,76	0,83
30	0,59	0,66	0,70	0,74	0,78	0,84
40	0,63	0,70	0,73	0,77	0,81	0,87
50	0,66	0,73	0,76	0,79	0,83	0,88
60	0,69	0,75	0,78	0,81	0,84	0,89
80	0,72	0,78	0,80	0,83	0,86	0,90
100	0,74	0,80	0,82	0,85	0,88	0,91
150	0,78	0,83	0,85	0,87	0,90	0,93
200	0,81	0,85	0,87	0,89	0,91	0,94
250	0,83	0,86	0,88	0,90	0,92	0,95
300	0,84	0,88	0,89	0,91	0,93	0,95
400	0,86	0,89	0,91	0,92	0,94	0,96
500	0,87	0,90	0,92	0,93	0,94	0,96
600	0,88	0,91	0,92	0,94	0,95	0,97
800	0,90	0,92	0,93	0,94	0,96	0,97
1000	0,91	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97
			Tegur r_3			
1	0,14	0,22	0,27	0,33	0,43	0,62
2	0,22	0,30	0,36	0,42	0,51	0,67
3	0,27	0,36	0,42	0,48	0,57	0,70
4	0,31	0,40	0,46	0,52	0,60	0,73
5	0,34	0,43	0,49	0,55	0,62	0,75
6	0,36	0,46	0,52	0,57	0,65	0,76
8	0,41	0,50	0,56	0,61	0,68	0,78
10	0,44	0,53	0,58	0,64	0,70	0,80
15	0,50	0,59	0,64	0,68	0,74	0,83
20	0,54	0,63	0,67	0,72	0,77	0,85
25	0,58	0,66	0,70	0,74	0,79	0,86
30	0,60	0,68	0,72	0,76	0,80	0,87
40	0,64	0,71	0,75	0,78	0,83	0,88
50	0,67	0,74	0,77	0,80	0,84	0,89
60	0,70	0,76	0,79	0,82	0,86	0,90

m	α'					
	0,999	0,990	0,975	0,950	0,900	0,800
80	0,73	0,78	0,81	0,84	0,87	0,91
100	0,75	0,80	0,83	0,86	0,88	0,92
150	0,79	0,84	0,86	0,88	0,90	0,93
200	0,81	0,86	0,88	0,89	0,92	0,94
250	0,83	0,87	0,89	0,90	0,92	0,95
300	0,84	0,88	0,90	0,91	0,93	0,95
400	0,86	0,89	0,91	0,92	0,94	0,96
500	0,88	0,90	0,92	0,93	0,94	0,96
600	0,89	0,91	0,92	0,94	0,95	0,97
800	0,90	0,92	0,93	0,94	0,96	0,97
1000	0,91	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97
			Tegur r_0			
0	0,14	0,22	0,27	0,33	0,43	0,62

Detailide tõrkeintensiivsus

Raadiodetailide tõrkeintensiivsuse väärtuste tabel on koostatud D. R. Earles'i ja M. F. Eddinsi USA 9. rahvuslikul töökindluse ja kvaliteedi kontrolli sümpoosionil 1963. a. tehtud ettekande «Töökindlusfüüsika (tõrgetefüüsika)» põhjal.

Kasutatavad tõrkeintensiivsuse väärtused on elektronarvutite detailide tõrkeintensiivsuse väärtused laboratoorsetes tingimustes või teiste süsteemide ja seadmete raadiodetailide tõrkeintensiivsuse väärtused taandatult laboratoorse arvuti tingimustele.

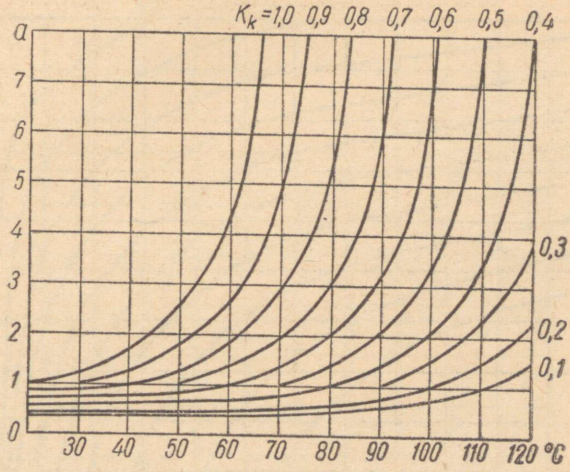
Detaili nimetus	Tõrkeintensiivsus $\lambda \cdot 10^6 \frac{1}{h}$		
	Mini-maalne	Keskmine	Maksi-maalne
1	2	3	4
Alaldi	0,26	0,6	1,6
Sileenventiil	0,26	0,76	1,6
Pooljuhtdiood	0,16	0,2	1,47
Germaaniumdiood	0,002	0,157	0,678
Võimsusdiood	0,018	1,42	3,0
Seleendiood	0,11	0,2	0,9
Ränidiood	0,021	0,2	0,452
Ränikarbiiddiood	0,002	0,10	0,55
Zeneri diood	0,08	0,15	0,773
Katoodkiiretoru	0,94	1,65	3,10
Diood	0,24	0,80	2,5
Kaksikdiood (üks lambi pool)	0,32	0,80	2,00
Kaksikdiood (sidestatud)	0,38	1,00	1,97
Triood	0,67	1,3	3,86
Kaksiktriood (üks lambi pool)	0,52	1,3	3,79
Kaksiktriood (sidestatud)	1,17	2,0	3,88
Tetrood	0,88	1,8	3,90
Pentood	0,73	2,5	3,86
Võimsusvõimendi	12,0	20,0	40,0
Väikese võimsusega türatron	2,5	6,0	15,0
Suure võimsusega türatron	6,3	15,0	34,0
Stabilitron	0,07	0,24	1,0
Klüstron	0,56	3,5	8,0
Magnetron	8,00	100	1000
Mittehäälestatav magnetron	8,00	22,0	48,0
Häälestatav magnetron	16,0	150	1000
Miniatuurne magnetron	0,55	1,90	15,8
Võimsusmagnetron	0,17	10,0	25,0
Võimsusimpulssmagnetron	8,36	13,0	20,0
Elektronalaldi	1,1	2,5	7,5
Miniatuurne elektronalaldi	2,1	3,08	5,70
Türatron	1,8	2,65	5,26
Generaatortüratron	3,8	58,2	175,0
Töökindel diood	0,36	0,8	1,49

1	2	3	4
Töökindel kaksikdiood (üks lambi			
„ pool)	0,20	0,78	1,50
„ kaksikdiood (sidestatud) .	0,22	1,0	1,50
„ triood	0,19	0,89	3,00
kaksiktriood (üks lambi			
„ pool)	0,23	0,91	2,00
kaksiktriood (sidestatud) .	0,30	1,45	3,00
„ tetrood	0,68	1,6	2,5
„ pentood	0,79	1,6	2,8
„ võimsusvõimendi	6,0	20,0	32,0
„ väikese võimsusega türat-			
„ ron	0,25	2,0	3,7
Töökindel võimsustüratron	3,00	5,0	11,3
„ stabilitron	0,12	0,35	0,78
„ klüstron	1,20	3,00	6,00
„ mittehäälestatav magnetron	75,0	150	350
„ järelhäälestatav magnetron	40,0	150	300
„ häälestatav magnetron . .	450,0	3000	5500
Töökindel impulssgeneraator	20,0	30,0	43,0
„ mikrolainegeneraator . . .	9,7	20,0	32,0
„ katoodkiiretoru	0,65	0,95	1,5
Töökindel alaldi	0,83	1,50	2,76
Subminiatuurne alaldi	0,36	1,5	4,31
„ diood	0,72	1,3	2,2
„ kaksikdiood	0,26	0,85	1,7
„ sidestatud kaksik-			
diood	0,39	1,6	2,21
„ triood	0,53	1,75	2,91
„ kaksiktriood	0,41	1,34	2,29
„ sidestatud kaksik-			
triood	0,78	2,6	4,31
„ tetrood	0,69	2,15	3,62
„ pentood	0,69	2,15	3,62
„ väikese võimsusega			
türatron	0,28	1,7	4,41
„ võimsustüratron . .	1,95	6,5	11,1
„ stabilitron	0,45	1,70	6,5
Kondensaator	0,001	0,1	2,39
Keraamiline kondensaator	0,042	0,15	1,64
„ „ pingega alla			
660 V	0,04	0,0625	0,133
„ läbiviikkondensaator . .	0,088	2,95	4,42
„ kõrgekvaliteediline kon-			
densaator	0,011	0,06	0,29
„ muudetava mahtuvusega			
kondensaator	0,01	0,02	0,35
Elektrolüütkondensaator	0,003	0,035	0,513
Alumiiniumist elektrolüütkondensaa-			
tor	0,02	0,135	0,425

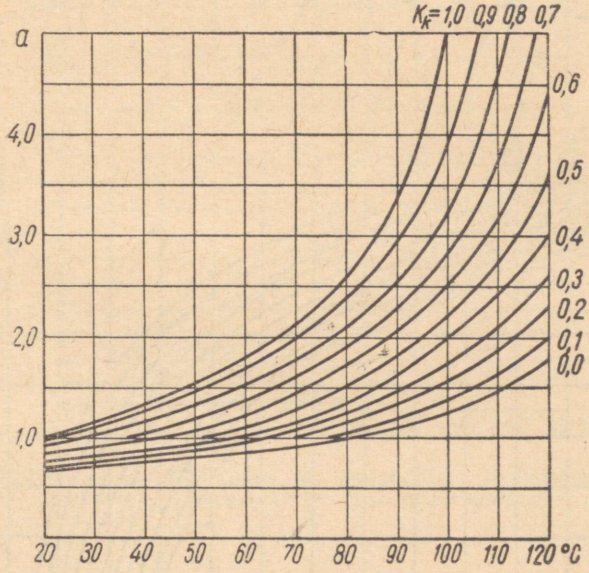
1	2	3	4
Püsikondensaator, pingega üle 600 V	0,027	0,27	0,486
„ , „ alla 600 V	0,001	0,01	0,018
„ , „ üle 1000 V	0,133	0,325	2,39
Metallpaberkondensaator	0,045	0,054	0,076
Klaaskondensaator	0,0006	0,05	0,87
Vilkkondensaator	0,005	0,075	0,132
Vilkkondensaator, pingega alla 600 V	0,009	0,0375	0,066
Nööbikujuline vilkkondensaator	0,003	0,03	0,068
Kõrgekvaliteediline metallpaber-vilk-kondensaator	0,014	0,045	0,076
Hõbetatud vilkkondensaator	0,025	0,083	1,41
Kõrgekvaliteediline hõbetatud vilk-kondensaator	0,009	0,083	0,188
Õlikondensaator	0,12	0,3	1,95
Paberkondensaator	0,003	0,05	0,29
Paberkondensaator, pingega alla 600 V	0,01	0,025	0,04
Paberkondensaator pingega üle 600 V	0,0083	0,09	0,235
Paber-nailonkondensaator	0,006	0,01	0,014
Plastiline kondensaator	0,003	0,135	0,178
Portselankondensaator	0,04	0,09	1,02
Tantaalkondensaator	0,103	0,6	1,93
Tantaal-metallpaber-kondensaator	0,001	0,117	0,5
Polariseerimata tantaal-metallpaber-kondensaator	0,08	0,1	2,0
Polariseeritud tantaal-metallpaber-kondensaator	0,075	0,1	2,2
Muudetav kondensaator	0,09	0,163	2,26
Muudetav õhkkondensaator	0,01	0,034	0,082
Kristallid	0,04	0,1	0,14
Sageduskristall	0,84	1,0	1,24
Ostsillaatorkristall	0,1	0,6	1,1
Segustuskristall	0,02	0,18	0,97
Kvartskristall	0,016	0,162	0,2
Kõrgsageduskristall	0,025	0,3	0,6
Alaldikristall	0,03	0,2	0,371
Lainejuhtmed	0,59	1,5	4,54
Jäigad lainejuhtmed	0,59	1,1	1,92
Painduvad lainejuhtmed	1,13	2,64	4,54
Lüliti	0,045	0,138	0,949
Mõõteriist	0,005	0,025	5,77
Elektrimõõteriist	0,005	0,036	5,77
Vahelduvvoolumõõteriist	0,021	0,026	0,035
Alalisvoolumõõteriist	0,017	0,036	0,040
Pool	0,008	0,05	0,33
Paispool	0,002	0,02	0,1
Paispool filtris	0,008	0,03	0,09
Anoodpaispool	0,009	0,02	0,31
Kõrgsageduspaispool	0,005	0,01	0,05

1	2	3	4
Häälestuspaispool	0,0142	0,15	0,29
Potentsiomeeter	0,018	3,0	15,9
Süsipotentsiomeeter	0,1	0,25	4,44
Kompensatsioonpotentsiomeeter	0,018	0,1	0,3
Arvutuspotentsiomeeter	0,537	5,0	11,0
Traatpotentsiomeeter	0,137	1,4	2,05
Miniatuurne traatpotentsiomeeter	0,53	1,2	2,04
Ankurtüüpi relee (tõrkeintensiivsus ühe kontaktigrupi kohta)	0,11	0,3	0,5
Üldkasutatav relee	0,10	0,25	0,48
Solenoidpooliga relee, rasketes tingimustes kasutatav	0,3	0,5	0,81
Hermeetiline relee	0,02	0,04	0,19
Väikesegabariidiline relee	0,145	0,25	0,54
Millisekundilise toimega relee	0,18	0,44	0,84
Miniatuurne relee	0,03	0,06	0,25
„ kiiretoimeline relee	0,42	0,7	1,13
Võimsusrelee	0,15	0,3	4,1
Tundlik relee	0,03	0,4	0,57
Termorelee	0,12	0,4	1,0
Takisti	0,001	0,159	1,00
Süsitakisti	0,005	0,045	0,888
Komposiittakisti	0,005	0,043	0,297
Muudetav komposiittakisti	0,007	0,053	0,533
Kiletakisti	0,011	0,03	0,058
Metall-kiletakisti	0,004	0,04	0,4
Püsitakisti	0,005	0,03	0,888
Väljavõttega täppistakisti	0,041	0,125	0,292
Türiittakisti (ebalineaarne)	0,047	0,1	0,153
Traattakisti	0,042	0,087	0,197
Täppis-traattakisti	0,038	0,068	0,126
Võimsus-traattakisti	0,021	0,04	0,076
Pretsiisne traattakisti	0,032	0,06	0,114
Muudetav traattakisti	0,02	0,031	0,807
Muudetav takisti	0,02	0,186	0,5
Sulavkaitse	0,001	0,5	2,75
Termistor	0,03	0,6	1,4
Trafo	0,01	0,15	2,08
Helisagedustrafo	0,01	0,02	0,04
Kontrolltrafo	0,035	0,6	0,8
Küttetrafo	0,013	0,027	0,06
Sisendtrafo	0,12	1,09	2,08
Vahesagedustrafo	0,020	0,08	0,31
Magnetvõimendi	0,052	0,152	0,485
Väljundtrafo	0,04	0,09	0,2
Anoodtrafo	0,012	0,025	0,052
Võimsustrafo	0,03	0,5	1,69
Täppistrafo	0,092	0,263	0,814

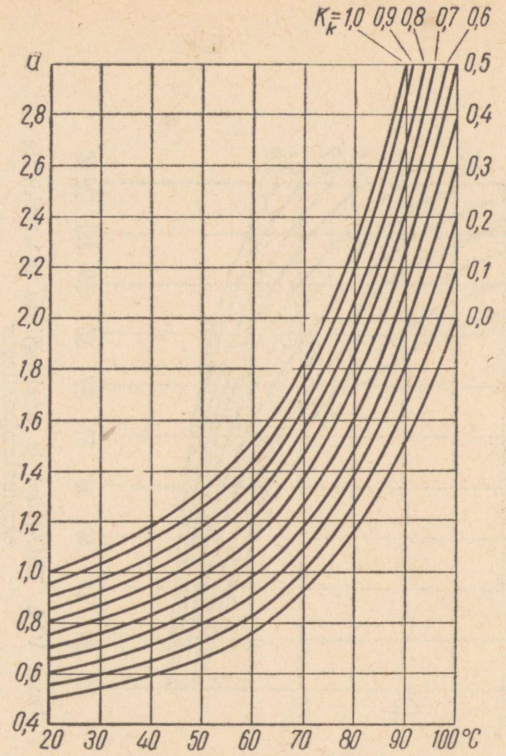
1	2	3	4
Impulsstrafo	0,03	0,17	0,235
Kõrgsagedustrafo	0,019	0,045	0,062
Reguleeritav trafo	0,035	0,1	0,31
Transistor	0,025	0,61	1,44
Transistor võimendis	0,31	0,5	0,84
Germaaniumtransistor	0,05	0,3	1,91
Võimsus-germaaniumtransistor	0,33	0,6	1,4
Ränitransistor	0,1	0,5	1,44
Transistor, töötab lüliti režiimis	0,10	0,4	0,71
Pind-barjäärtransistor	0,04	0,12	1,33
Vibraator	0,4	0,5	1,2
Viiteliin	0,016	0,11	6,78
Püsiviiteliin	0,016	0,146	0,339
Muudetav viiteliin	0,22	0,3	6,78



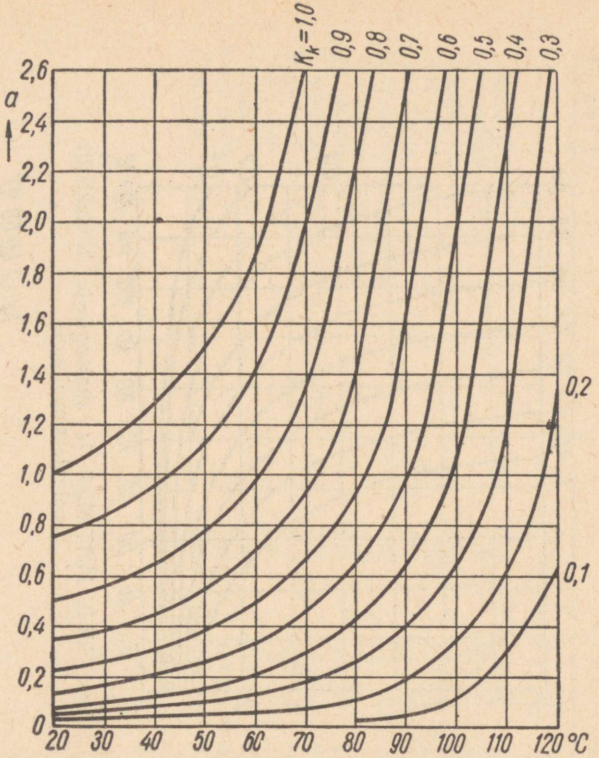
Joon. VI 1. МЛТ-tüüpi ja analoogiliste kiletakistite ekspluatatsioonitegur



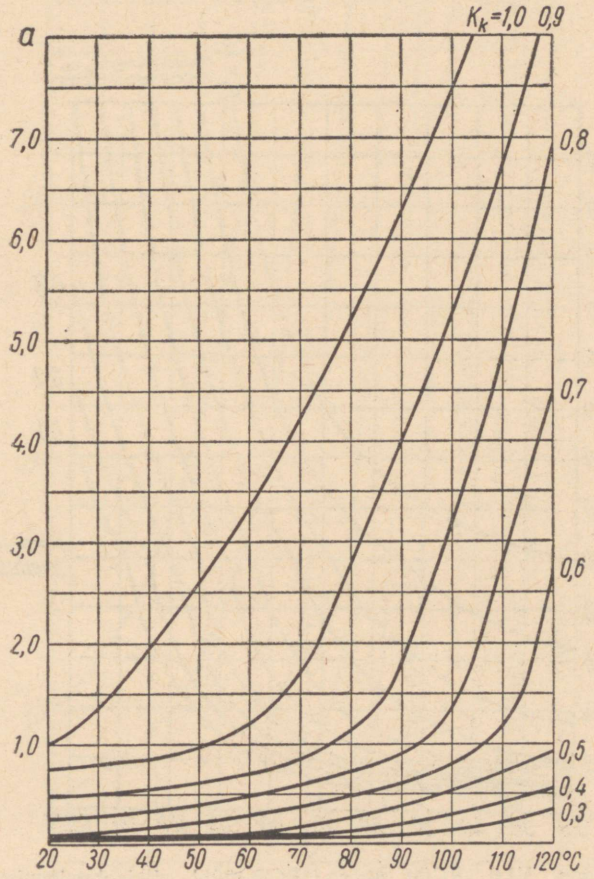
Joon. VI 2. TBO-tüüpi ja analoogiliste masstakistite ekspluatatsioonitegur



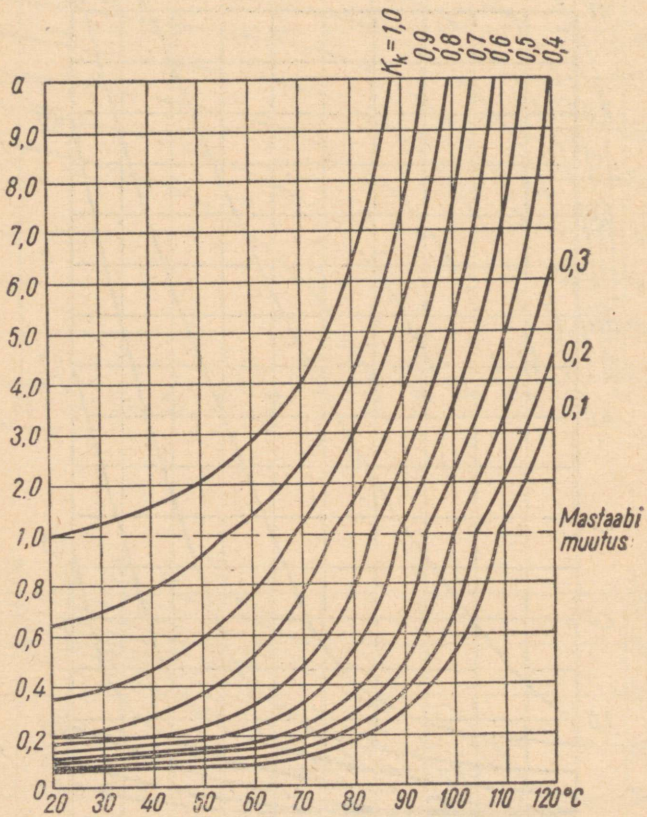
Joon. VI 3. Traattakistite ekspluatatsioonitegur



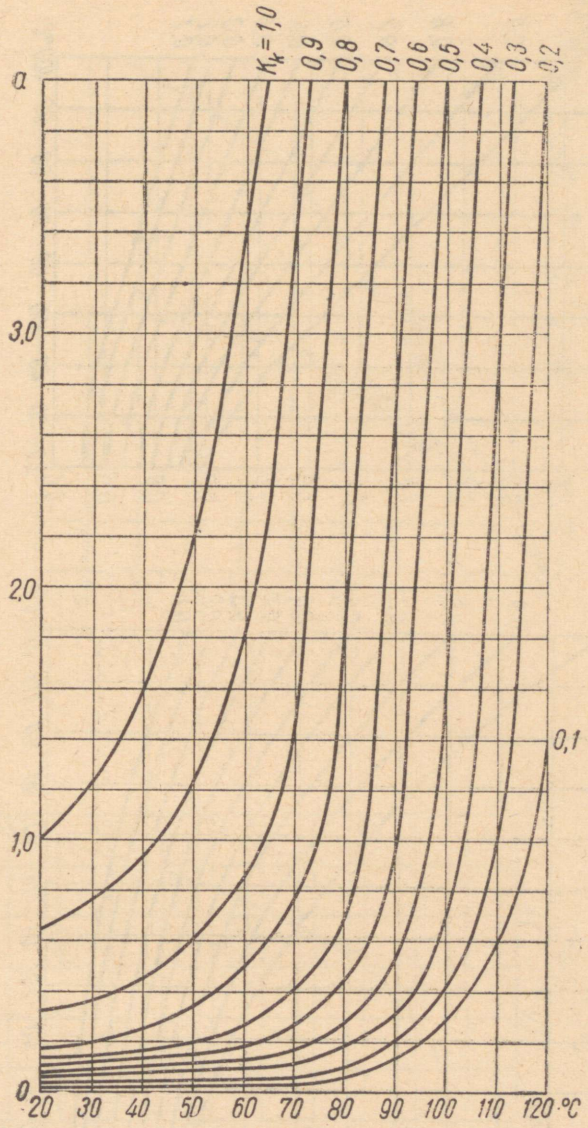
Joon. VI 4. KTK- ning КДК-tüüpi ja analoogiliste keraamilise isolatsiooniga kondensaatorite ekspluatatsioonitegur



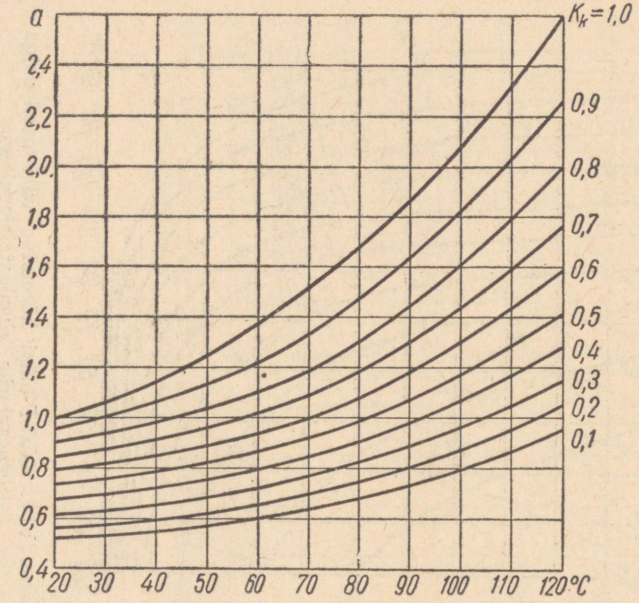
Joon. VI 5. КБГ-tüüpi ja analoogiliste paberisolatsiooniga kondensaatorite ekspluatatsioonitegur



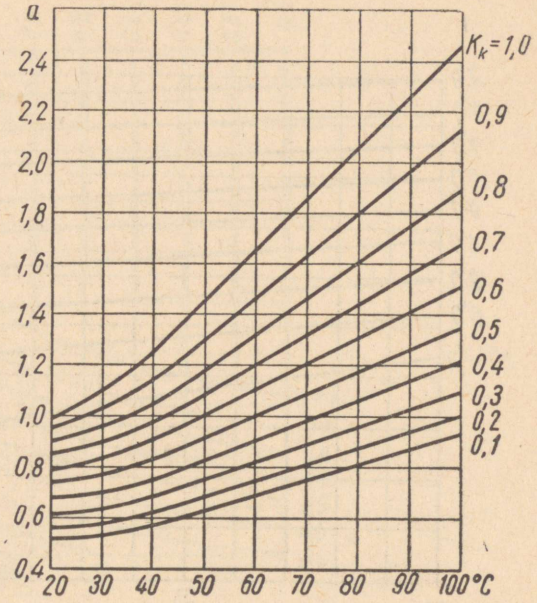
Joon. VI 6. KCO- ning OKCO-tüüpi vilkisolatsiooniga kondensaatorite ekspluatatsioonitegur



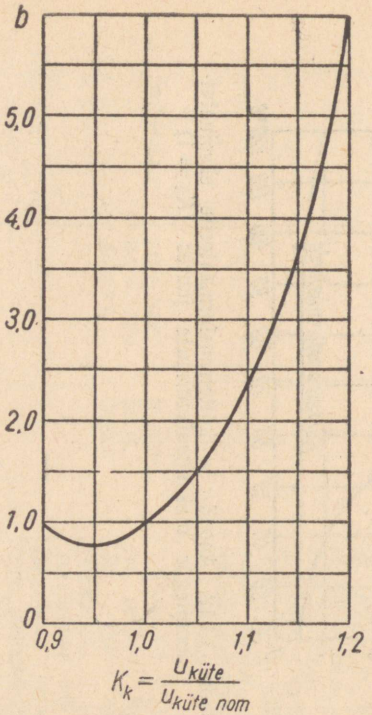
Joon. VI 7. КСО-Г-tüüpi hõbetatud vilkisolatsiooniga kondensaatorite ekspluatatsioonitegur



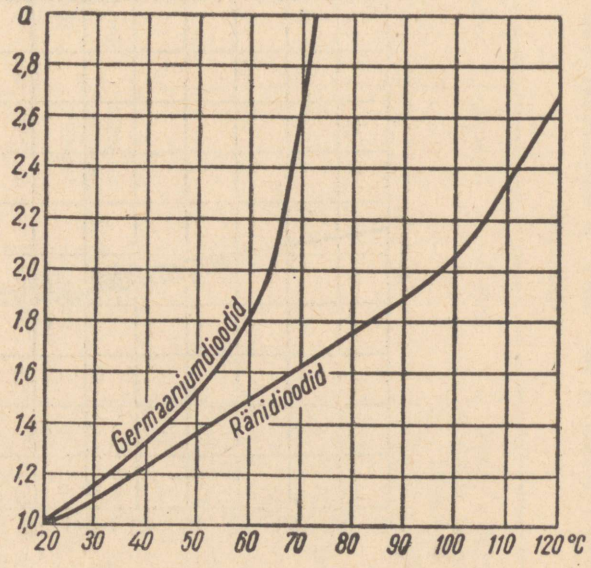
Joon. VI 8. Vaakuumdioodide ja -trioodide ekspluatatsioonitegur



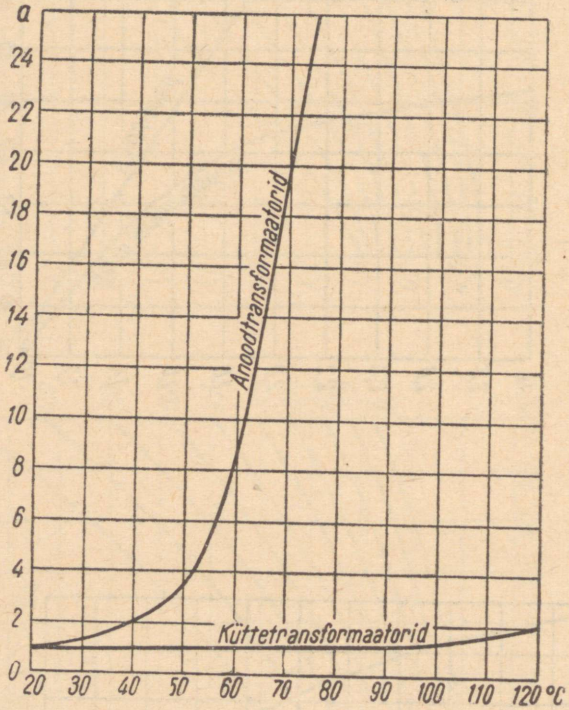
Joon. VI 9. Tetroodide ja pentoodide ekspluatatsioonitegur



Joon. VI 10. Vaakuumseadiste ekspluatatsioonitegur sõltuvalt küttepingest



Joon. VI 11. Germaanium- ja ränidioodide ekspluatatsioonitegur nimikoormusel ($K_k = 1{,}0$)



Joon. VI 12. Anood- ja küttetransformaatorite ekspluatatsioonitegur maksimaalkoormuse juures ($K_k = 1$)

Töökindlusalased terminid eesti, vene ja inglise keeles

Üldmõisted

1.	Süsteem	система	system	Koos tegutsevate objektide kogum, mis on määratud kindla ülesande iseseisvaks (sõltumatuks) täitmiseks. Märkus: objektide all mõistetakse tehnilisi seadmeid, mõnikord aga ka keskkonda (näiteks keskkonda, kus levivad elektromagnetilised lained) ja teenindavat personali
2.	Süsteemi element, element	элемент системы, элемент	system component, system element	Süsteemi osa, mis on määratud kindlate funktsioonide täitmiseks. Märkus: edaspidi kasutatakse termini «süsteemi element» asemel lühivormi «element»
3.	Korrasolek	исправность		Süsteemi (elemendi) seisund, kui kõik süsteemi (elemendi) nii põhilised kui ka teisejärgulised parameetrid (mis iseloomustavad käsitsemise hõlpsust, välisilmet jms.) antud ajamomendil vastavad esitatud nõuetele
4.	Rikkisolek	неисправность нрк. дефект	trouble, fault, defect	Süsteemi (elemendi) seisund, kui kas või üks süsteemi (elemendi) põhiline parameeter või teisejärguline parameeter (mis iseloomustab käsitsemise hõlpsust, välisilmet jms.) antud

				ajamomendil ei vasta esitatud nõuetele Märkus: eristatakse «põhilist rikkisolekut», mil kas või üks süsteemi (elemendi) põhiparameeter väljub ekspluatatsioonitolerantsi (vt. termin 60) ettenähtud piiridest ja mille vahetuks tulemuseks on tõrge, ning «teisejärgulist rikkisolekut», mil kas või üks süsteemi (elemendi) teisejärguline parameeter ei vasta esitatud nõuetele, kuid mille vahetuks tulemuseks ei või olla tõrge
5.	Töövõime	работоспособность, нрк. рабочее состояние		Süsteemi (elemendi) seisund antud ajamomendil, kui süsteemi (elemendi) kõik põhiparameetrid vastavad esitatud nõuetele
6.	Tõrge	отказ, нрк. выход из строя	failure	Süsteemi (elemendi) täielik või osaline töövõimekaotus (vt. termin 5) Märkus: tõrke vahetuks põhjuseks võib olla põhiline rikkisolek (vt. termin 4, märkus), teenindava personali ebaõige tegevus jms.
7.	Tõrketus	безотказность	reliability	Süsteemi (elemendi) omadus pidevalt säilitada töövõimet (vt. termin 5) antud ajavahemiku kestel kindlates ekspluatatsioonitingimustes; kvantitatiivselt määratakse tõenäosuslike

				karakteristikute ja parameetritega
8.	Kestvus	долговечность	longevity	Taastatava süsteemi (elemendi) omadus pikaajaliselt (võimalike vaheaegadega remondiks) säilitada kindlatel välistingimustel töövõimet kuni lagunemiseni või mõne teise äärmusliku seisundini Märkus 1. Äärmuslikku seisundit määratakse süsteemi (elemendi) parameetrite muutuse järgi, majanduslike näitajate järgi jne. Märkus 2. Mittetaastatava süsteemi (elemendi) kestvus on tema omadus säilitada tõrketusparameetreid teatud kindlates piirides
9.	Remonditavus	ремонтопригодность, нрк. восстанавливаемость, ремонтоспособность	maintainability	Süsteemi (elemendi) omadus, mis seisneb tema kohandatuses tõrgete avastamiseks ja kõrvaldamiseks, aga samuti nende ennetamiseks; kvantitatiivselt iseloomustatakse aja- ja vahendite kuluga tõrgete avastamiseks, kõrvaldamiseks ja ennetamiseks, kusjuures arvestatakse teenindava personali vajalikku kvalifikatsiooni Märkus: mittetaastatava elemendi (vt. termin 17, märkus 3) remonditavuse all mõistetakse tema kohandatavust kont-

				rolliks ja hõlpsaks vahetamiseks
10.	Töökindlus	надежность	dependability	Süsteemi (elemendi) omadus, mis määratakse tema tõrketuse, kestvuse ja remonditavusega ning mis kindlustab süsteemile (elemendile) ettenähtud ülesande täitmise, kvantitatiivselt määratakse tõenäosuslike karakteristikute ja parameetritega
11.	Säilivus	сохраняемость	storagebility	Süsteemi (elemendi) omadus ajaliselt säilitada korrasolekut antud säilitamis- ja transporditingimustes; kvantitatiivselt määratakse tõenäosuslike karakteristikute ja parameetritega
12.	Süsteemi vananemine	старение системы	system aging, system deterioration	Süsteemi parameetrite järkjärguline ja pidev muutumine tingitult materjalide vananemisest ja teistest protsessidest, mille olemasolu ei sõltu töörežiimist Märkus: analoogiliselt defineeritakse «elemendi vananemist»
13.	Süsteemi kulumine	изнашивание системы, нрк. износ	system wear-out	Süsteemi parameetrite järkjärguline muutumine mehaanilistest, elektrilistest, soojuslikest ja teistest koormustest, mille olemasolu määratakse ainult töörežiimiga Märkus: analoogiliselt määratakse «elemendi kulumine»

14.	Taastatavus	восстанавливаемость	restorability	Süsteemi (elemendi) omadus, mis määrab süsteemi parameetrite lubatud (nende hulgas esialgsete) väärtuste saamise võimaluse rikete kõrvaldamise tagajärjel
15.	Taastuvus	самовосстанавливаемость	selfrestorability	Taastatavus, mis kindlustatakse automaatselt või mis toimub iseseisvalt Märkus: taastuvuse mõistet kasutatakse näiteks automaatreserveerimisega süsteemis jne.
16.	Taastatav süsteem	восстанавливаемая система	restorable system, repairable system	Süsteem, mida tõrke tekkimise korral võib taastada Märkus: analoogiliselt defineeritakse «taastatavat elementi»
17.	Mittetaastatav süsteem	невосстанавливаемая система, нрк. неремонтируемая система	unrestorable system, non-repairable system	Süsteem, mis tõrke tekkimise korral ei kuulu taastamisele või mida ei saa taastada Märkus 1: mittetaastatav süsteem kuulub reeglina ühekordse kasutamisega süsteemide hulka Märkus 2: mõnikord võib süsteemi lugeda mittetaastatavaks ainult kasutamise ajavahemikus, muul ajal võib teda vaadelda kui taastatavat süsteemi Märkus 3: analoogiliselt defineeritakse «mittetaastatavat elementi»

Tõrgete klassifikatsioon

18.	Järsk tõrge	внезапный отказ, нрк. случайный отказ, грубый отказ	catastrophic failure, random failure, chance failure	Tõrge, mis tekkis süsteemi (elemendi) ühe või mitme põhilise parameetri väärtuse hüppelise muutumise tagajärjel
19.	Aeglane tõrge	постепенный отказ, нрк. негрубый отказ	deterioration failure, degradation failure, gradual failure	Tõrge, mis tekkis süsteemi (elemendi) ühe või mitme parameetri väärtuse järkjärgulise muutumise tagajärjel
20.	Sõltumatu tõrge	независимый отказ, нрк. первичный отказ, основной отказ	independent failure, primary failure	Mistahes tõrge, mida ei põhjustanud mõni muu eelnev tõrge
21.	Sõltuv tõrge	зависимый отказ, нрк. вторичный отказ	dependent failure, secondary failure	Tõrge, mis tekkis mingi teise tõrke tagajärjel
22.	Täistõrge	полный отказ		Tõrge, mille kõrvaldamiseta pole võimalik süsteemi (elementi) kasutada ettenähtud otstarbeks
23.	Osatõrge	частичный отказ		Tõrge, mille kõrvaldamiseta jääb võimalus kasutada süsteemi (elementi) kas või osaliselt ettenähtud otstarbeks
24.	Püsitõrge	устойчивый отказ	stable failure	Tõrge, mille saab kõrvaldada ainult nende abinõude tulemusena, mida kasutati süsteemi (elemendi) töövõime taastamiseks

25.	Hetktõrge	сбой, нрк. однократный отказ	short duration failure	Ühekordselt tekkiv ja iseenesest kõrvalduv tõrge, mille tegevuse kestus on väike võrreldes töötamise kestusega kuni järgmise tõrkeni (suurusjärgus mõni sekund või sekundi osa)
26.	Korduv hetktõrge	перемежающийся отказ, нрк. многократный отказ	intermittent failure	Rida kiirelt üksteisele järgnevaid hetktõrkeid
27.	Konstruktsiooniline tõrge	конструктивный отказ	design error failure	Tõrge, mis on tingitud konstruktori vigadest või konstrueerimismeetodite puudulikkusest
28.	Tehnoloogiline tõrge	технологический отказ		Tõrge, mis on tingitud ettenähtud tehnoloogilise protsessi rikkumisest või selle protsessi puudulikkusest
29.	Ekspluatatsiooniline tõrge	эксплуатационный отказ	operational failure	Tõrge, mis on tingitud ettenähtud ekspluatatsioonireeglite rikkumisest või antud süsteemi (elemendi) kasutamistingimustes ettenägemata välismõjudest
		Reserveerimine		
30.	Reserveerimine	резервирование, нрк. избыточность	redundancy	Süsteemi (elemendi) töökindluse suurendamise meetod reservsüsteemide ja -elementide kasutamise abil. Märkus: süsteemi suhtes eristatakse «üldist reserveerimist», kui süsteemi töökindluse suurenda-

				mine saavutatakse reservsüsteemide kasutamise abil, ja «osiiti reserveerimist», kui kasutatakse üksikuid reservelemente
31.	Alaline reserveerimine	постоянное резервирование	parallel redundancy, passive redundancy	Reserveerimine, mil reservsüsteemid (-elemendid) on ühendatud põhisüsteemidega (-elementidega) kogu töötamisaja kestel ja nad on põhisüsteemiga ühesuguses töörežiimis
32.	Asendusreserveerimine	резервирование замещением	active redundancy, stand-by redundancy	Reserveerimine, mil reservsüsteemid (-elemendid) asendavad põhilisi süsteeme pärast tõrke tekkimist
33.	Automaatreserveerimine	автоматическое резервирование	automatic redundancy	Reserveerimine, kus kasutatakse automaatset tõrgete avastamist ja tõrkunud süsteemi (elemendi) asendamist reservsüsteemiga (-elemendiga)
34.	Koormatud reserv	нагруженный резерв, нрк. горячий резерв	loaded reserve, hot reserve	Reservsüsteem (-element), mis asub töörežiimis
35.	Osaliselt koormatud reserv	облегченный резерв, нрк. горячий резерв		Reservsüsteem (-element), mis asub mittetäielikus töörežiimis
36.	Koormamata reserv	ненагруженный резерв, нрк, холодный резерв	unloaded reserve, cold reserve	Reservsüsteem (-element), mis ei asu tööolukorras
37.	Jadaühendus	последовательное соединение,	series connection	Süsteemide (elementide) kogum, kus tõrke tekkimise vaja-

		нрк. функциональное соединение, основное соединение		likuks ja piisavaks tingimuseks on kas või ühe (ükskõik millise) antud süsteemide kogumisse kuuluva süsteemi (elemendi) tõrge
38.	Rööp-ühendus	параллельное соединение, нрк. резервное соединение, вспомогательное соединение	parallel connection	Süsteemide (elementide) kogum, kus tõrke tekkimise vajalikuks ja piisavaks tingimuseks on kõikide antud kogumisse kuuluvate süsteemide (elementide) tõrge
39.	Sega-ühendus	смешанное соединение	mixed connection, series-parallel connection	Süsteemide (elementide) jada- ja rööpühenduste kombinatsioon
		Töökindlusparameetrid		
40.	Tööaeg Talitlus-aeg Tsüklite arv	наработка	operating time	Suurus, mida kasutatakse süsteemi (elemendi) töö kestuse mõõtmiseks. Märkus 1: seda suurust võib mõõta ajaühikutes, tsüklite ning lülitamiste arvuga jms. (siin toodud vastavad inglis-keelsed terminid nr-d 40...43 käivad suuruste kohta, mida mõõdetakse ajaühikutes). Märkus 2: edaspidised terminid on formuleeritud, kasutades terminit «tööaeg». Vastavalt vajadustele võib neid termineid formuleerida, kasutades termineid «talitlusaeg», «tsüklite arv», «lülitamiste arv» jne.

41.	Tõrgetevaheline tööaeg	наработка между отказами	time between failures	Tööaeg taastatava süsteemi (elemendi) kahe teineteisele järgneva tõrke vahel. Märkus: tõrgetevaheline tööaeg on juhuslik suurus
42.	Keskmine tõrketu tööaeg	наработка на отказ	mean time between failures	Tõrgetevahelise tööaja keskväärtus
43.	Summaarne tõrketu tööaeg	суммарная наработка	accumulated operating time	Ühe või mitme süsteemi (elemendi) tõrketute tööaegade summa teatud aja jooksul
44.	Garanteeritud tööaeg, garantiiaeg	гарантированная наработка		Tööaeg, mida omab vähemalt β protsenti süsteemidest (elementidest) (β-tööaja garantiitõenäosus protsentides)
45.	Tehniline ressurss	технический ресурс		Taastatava süsteemi (elemendi) summaarne tõrketu tööaeg kasutamise algusest kuni selle lõpetamiseni tingitult mõnest äärmuslikust seisundist (vt. termin 8, märkus 1) Märkus 1: eristatakse «ettenähtud tehnilist ressurssi», «keskmist tehnilist ressurssi», «individuaalset tehnilist ressurssi» jms. Märkus 2: mittetaastatava süsteemi (elemendi) tehniline ressurss määratakse ajavahemikuga kasutamise algusest kuni mõne äärmusliku seisundini (vt. termin 8, märkus 2)

46.	Garanteeritud ressurss	гарантированный ресурс		Tehniline ressurss, mida omab vähemalt γ protsenti süsteemidest (elementidest) (γ-ressursi garantiitõenäosus protsentides)
47.	Teenistusiga, iga	срок службы	life	Kalendaarne ajavahemik toote kasutuselevõtmise algusest kasutamise lõpetamiseni tingitult purunemisest või mõnest muust äärmuslikust seisundist
48.	Etteantud tõrketu tööaeg	заданная наработка, заданная продолжительность, нрк. длительность задания, рабочее время	operating time, mission time	Süsteemi (elemendi) eelnevalt kindlaksmääratud tõrketu tööaeg, mis on vajalik teatud ülesande täitmiseks
49.	Seisuaeg	продолжительность простая, простой, нрк. длительность, простая	down time	Mingisugustel põhjustel tekkinud vaheaja kestus süsteemi (taastatava elemendi) töös. Märkus: eristatakse «sunnitud seisaku kestust» («taastamiskestust»), «keskmist seisaku ja planeeritud seisaku kestust»
50.	Tõrketu töö tõenäosus	вероятность безотказной работы	probability of survival	Tõenäosus, et kindlates kasutamistingimustes etteantud töötamiskestuse jooksul tõrget ei teki
51.	Tõrkesagedus	частота отказов	failure density function	Süsteemi (elemendi) tööaja tõenäosustihedus kuni esimese tõrkeni; statistiliselt määratakse kui kat-

				seajal tõrkunud süsteemide (elementide) arvu jagatis katsetatavate süsteemide (elementide) esialgse arvu ja vaadeldava ajavahemiku korrutisega. Märkus: tõrkesagedus määratakse tingimusel, et kõik süsteemid (elemendid) on ühetüübilised, neid katsetatakse või nad töötavad ühesuguses režiimis ja tõrgete puhul neid ei taastata ega asendata
52.	Tõrke-intensiivsus	интенсивность отказов, нрк. опасность отказов, лямбда-характеристика	failure-rate, hazard	Katsete (töö) käigus mittetaastatava süsteemi (elemendi) tõrkesageduse suhe tõrgeteta töö tõenäosusega ühe ja sama ajamomendi jaoks; statistiliselt määratakse see kindlaks kui katseajal tõrkunud süsteemide (elementide) arvu jagatis ajavahemiku alguseks töövõimeliste süsteemide (elementide) arvu ja ajavahemiku korrutisega. Märkus: tõrkeintensiivsus määratakse tingimusel, et kõik süsteemid (elemendid) on ühetüübilised, neid katsetatakse või nad töötavad ühesuguses režiimis ja tõrke tekkimise puhul neid ei asendata
53.	Tõrkevoo parameeter	параметр потока отказов		Taastatava süsteemi (elemendi) keskmine tõrgete arv aja-

				ühikus vaadeldaval ajamomendil. Märkus: tõrkevoogu mõistetakse massilise teenindamise teooria seisukohalt sündmuste voona, kus iga sündmus seisneb tõrke tekkimises
54.	Tehniline kasutustegur	коэффициент технического использования		Süsteemi tehnilise ressursi suhe tehnilise ressursi, remontide summaarse kestuse ja profülaktiliste tööde summaarse kestuse summasse
55.	Valmidustegur	коэффициент готовности, нрк. коэффициент использования, коэффициент исправного действия	availability, in-commission rate	Tõenäosus, et antud süsteem (element) on töövõimeline vabalt valitud ajamomendil
56.	Seisakutegur	коэффициент простоя	down time ratio	Tõenäosus, et antud süsteem (element) pole töövõimeline vabalt valitud ajamomendil. Märkus: antud süsteemi (elemendi) seisakuteguri ja valmidusteguri summa võrdub ühega
57.	Koormustegur	коэффициент нагрузки	relative severety factor	Töötavale süsteemile (elemendile) mõjuva koormuse suhe nimikoormusega (mis on määratud standarditega, kasutamisjuhenditega ja teiste vastavate dokumentidega) kindlates kasutamistingimustes

				Märkus: real juhtudel võib ühte ja sama süsteemi (elementi) iseloomustada mitme, väärtuse poolest erineva koormusteguriga sõltuvalt koormuse iseloomust (mehaaniline, elektriline, soojuslik jt.)
58.	Tootmistolerants	производственный допуск		Standardite, tootmistehniliste tingimuste ja teiste vastavate dokumentidega määratud valmistatava süsteemi (elemendi) parameetri tolerants
59.	Remonditolerants	ремонтный допуск		Remondi tehniliste tingimuste ja teiste vastavate dokumentidega määratud remonditava süsteemi (elemendi) parameetri tolerants
60.	Ekspluatatsioonitolerants	эксплуатационный допуск		Kasutamisjuhendite ja teiste vastavate dokumentidega määratud kasutatava süsteemi (elemendi) parameetri tolerants
61.	Reserveerimiskordsus	кратность резервирования	redundancy rate	Reservsüsteemide (-elementide) arvu suhe (töötavate) põhisüsteemide (-elementide) arvuga
62.	Keerukusnäitaja	показатель сложности, нрк. оценка сложности, параметр сложности	complexity units, complexity factor	Suurus, mis ühe või teise tunnuse järgi iseloomustab süsteemi (elemendi) keerukust. Märkus: esimeses lähenduses võib keerukusnäitajaks olla näiteks detailide arv süsteemis (elemendis)

Katsed

63.	Töökindluskatse	испытание на надежность	reliability test	Süsteemi (elemendi) töökindlusparameetrite väärtuste eksperimentaalne määramine kindla metoodika kohaselt eesmärgiga hinnata nende vastavust tehnilistele tingimustele
64.	Kestvuskatse	испытание на долговечность	life test, longevity test	Mittetaastatava elemendi kestvusparameetri väärtuse eksperimentaalne määramine kindla metoodika kohaselt eesmärgiga hinnata selle parameetri vastavust tehniliste tingimuste nõuetele
65.	Säilivuskatse	испытание на сохранность		Süsteemi (elemendi) säilivusparameetrite väärtuste eksperimentaalne määramine kindla metoodika kohaselt eesmärgiga hinnata nende vastavust tehniliste tingimuste nõuetele
66.	Kiirendatud katse	ускоренные испытания	accelerated test	Töökindlus-, kestvus- jt. katsed forsseeritud režiimis eesmärgiga teha need katsed lühendatud tähtaegadel
67.	Piirikatse	граничные испытания	marginal testing, marginal checking	Süsteemi elementide parameetrite väärtuste lubatud muutuste eksperimentaalne hindamine sõltuvalt välistingimuste ja töörežiimide muutumisest

68.	Tõrgete prognoos	прогнозирование отказов		Oodatava tõrkeni töötamise või säilimise tõenäolise aja eksperimentaalne hindamine ja samuti nende elementide väljaselgitamine, mille tõrge prognoositaval perioodil on kõige tõenäolisem; teostatakse süsteemi (elemendi) parameetrite väärtuste mõõtmise teel vastava metoodika kohaselt
69.	Talitluskatse Katseekspluatatsioon	опытная эксплуатация	reliability field test	Süsteemi (elemendi) spetsiaalselt organiseeritud kasutamine maksimaalselt normaalsetele lähendatud tingimustes regulaarse kontrolli all eesmärgiga uurida süsteemi (elemendi) ekspluatatsioonilisi omadusi, eeskätt tema töökindlust antud tingimustes

Sisukord

EESSÕNA 3

Sissejuhatus 5

0. 1. Kvaliteet ja töökindlus 5
0. 2. Põhimõisted 11

1. peatükk. Töökindlusparameetrid 19

1. 1. Mittetaastatavate elementide ja süsteemide tõrketusparameetrid 19
1. 2. Tõrketu tööaja eksponent- ja normaaljaotus 31
1. 3. Süsteemi tõrketusparameetrite määramine elementide tõrketusparameetrite kaudu 40
1. 4. Taastatavate süsteemide tõrketusparameetrid 46
1. 5. Remonditavusparameetrid. Tehniline ressurss 57

2. peatükk. Ümbritsev keskkond ja aparatuuri kasutamisolud. Raadiodetailide töökindlus 63

2. 1. Ümbritsev keskkond ja aparatuuri kasutamisolud . . . 63
2. 2. Kasutamisolude mõju aparatuurile 76
2. 3. Raadiodetailide töökindlus 79
2. 4. Aparatuuri tõrketusparameetrite arvutamine detailide tõrketusparameetrite järgi 90

3. peatükk. Täpsus ja töökindlus 101

3. 1. Järskude ja aeglaste tõrgete tõenäosus 101
3. 2. Mõõteriistade täpsus ja aeglased tõrked 104
3. 3. Mõjukoefitsientide meetod ja juhuslike funktsioonide lineariseerimine 114
3. 4. Kontrollseadmete täpsuse osa aeglaste tõrgete fikseerimisel 138

4. peatükk. Töökindluskatsed 152

4. 1. Katsete eesmärk ja metoodika 152
4. 2. Katsetulemuste tõlgitsemine 165

5. peatükk. Reserveerimine 182

5. 1. Reserveerimise olemus 182
5. 2. Lihtsamad matemaatilised seosed 187

Kirjanduse loetelu 196

Lisa I. Funktsiooni $y = \exp[-x]$ väärtuste tabel 199

Lisa II. Funktsiooni $\Phi(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{x}\exp\left[-\frac{u^2}{2}\right]du$ väärtuste tabel 203

Lisa III. Funktsiooni $\Phi(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{x}\exp\left[-\frac{u^2}{2}\right]du$ pöördfunktsiooni väärtuste tabel 204

Lisa IV. Tegurid usaldatavusradade määramiseks Poissoni jaotuse, gammajaotuse ja eksponentjaotuse korral . . . 205

Lisa V. Detailide tõrkeintensiivsus 208

Lisa VI. Ekspluatatsioonitegurite graafikud 213

Lisa VII. Töökindlusalased terminid eesti, vene ja inglise keeles 221

Kostrelieksemplar

Антс Коорт. НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ. На эстонском языке. Издательство «Валгус». Таллин, Пярнуское шоссе. 10.

Toimetaja J. Ristoja. Kunstiline toimetaja R. Tungla. Tehniline toimetaja L. Krikmann. Korrektor E. Bitter. Laduda antud 10. III 1967. Trükkida antud 27. XI 1967. Paber 54×84/16. Trükipaber nr. 2, Kohila Paberivabrik. Trükipoognaid 15. Tingtrükipoognaid 12,6. Arvestuspoognaid 12,56. Trükiarv 2000. MB-06099. Tell. nr. 1774. Hans Heidemanni nim. trükikoda, Tartu, Ülikooli 17/19. II.

Hind 73 kop.

73 kop.

A-28 903

TÜ RAAMATUKOGU
1 0300 00449188 4