HRVOJE POŽAR

SNAGA I ENERGIJA U ELEKTROENERGETSKIM SISTEMIMA

SNAGA I ENERGIJA
U ELEKTROENERGETSKIM SISTEMIMA

Snaga i energija u elektroenergetskim sistemima

Dr ing. HRVOJE POŽAR

redovni profesor Elektrotehničkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu,
član dopisnik Jugoslavenske akademije znanosti i umjetnosti,
suradnik Instituta za elektroprivredu u Zagrebu

BEOGRAD
1966.

ZAJEDNICA JUGOSLOVENSKE ELEKTROPRIVREDE

Autorsko pravo pridržano

Svojoj supruzi
za njezinu ljubav,
razumijevanje i strpljenje
posvećujem

Predgovor

Ova je knjiga rezultat višegodišnjeg rada na proučavanju problema elektroenergetskog sistema Jugoslavije, pa su mnoge prikazane metode bile razvijene u prvom redu sa svrhom da se pronađu rješenja, koja bi se mogla primijeniti u našem elektroenergetskom sistemu.

Moja je želja da objavljivanjem ove knjige s jedne strane prikažem u zaokruženom obliku dosadašnji rad na problemima odnosa u elektroenergetskom sistemu hidroelektrana i termoelektrana i njegovog razvoja, a s druge strane da u okviru svojih mogućnosti potpomognem daljnjem uspješnom razvitku naše elektroprivrede.

Zahvaljujem Zajednici jugoslavenske elektroprivrede, koja je — na inicijativu ing. Ibrahima IMAMOVIĆA, za što sam posebno zahvalan — omogućila naše izdanje ove knjige.

Zagreb, u ljetu 1965. *H. Požar*

PREDGOVOR NJEMAČKOM IZDANJU*

Prilikom donošenja odluke o izgradnji elektrana i vodova potrebno je uzeti u obzir različite faktore i odnose, koji mogu već prema prilikama imati znatnog utjecaja na karakteristike i redoslijed izgradnje postrojenja. Zbog toga je korisno utvrditi i analizirati prilike u elektroenergetskom sistemu, jer je samo tako moguće odrediti ono i onakvo postrojenje, koje najbolje odgovara — u određenom stepenu razvoja sistema — tehničkim i ekonomskim zahtjevima.

U knjizi su takvi faktori i odnosi razmatrani i ispitivani. Prikazane su mogućnosti prilagođavanja pogona elektrana promjenama opterećenja i dnevnom dijagramu opterećenja. Razvijene su metode za određivanje mogućnosti korištenja hidroelektrana i potrebnog angažiranja termoelektrana. Prikazan je utjecaj udjela hidroenergije na odnose u elektroenergetskom sistemu. Na osnovu takvih odnosa razmatra se: problem sigurnosti dobave električne energije, kriteriji energetske vrijednosti hidroelektrana, određivanje veličine izgradnje hidroelektrana i veličine akumulacionog bazena, pitanje vrijednosti gubitaka prijenosa i transformacije ovisne o odnosima u sistemu, određivanje opeterećenja vodova, kao i problem vremenskog redoslijeda izgradnje elektrana.

Poznavanje odnosa u sistemu nije samo od osnovnog značenja za razvijene elektroenergetske sisteme, već i za sisteme, koji se tek počinju razvijati.

Znatan dio razmatranih pitanja tretiran je u mojim radovima u okviru Instituta za elektroprivredu u Zagrebu, u kojemu su izvršene opsežne računske analize i koji je u mnogome potpomogao napore u izradi ove knjige, na čemu sam naročito zahvalan.

Dalje zahvaljujem mojem višem stručnom suradniku Ing. Toussaint-u LEVIČNIKU, koji mi je u najužoj suradnji znatno pomogao u izradi njemačkog izdanja. Također sam zahvalan Ing. Borisu MARKOVČIĆU, koji je obradio problem gubitaka u dugim i vrlo dugim vodovima kao prilog jednom od mojih ranijih radova. Osim toga zahvaljujem na pomoći kod pregleda rukopisa, kotroli formula i crteža mojem asistentu Ing. Vjekoslavu FILIPOVIĆU i mojem suradniku u Institutu za elektroprivredu Ing. Boži UDOVČIĆU.

---

*POŽAR, H.: Leistung und Energie in Verbundsystemen. Wien, Springar 1963.

Izdavačka kuća Springer trudila se je poznatom i tradicionalnom brigom, da knjigu besprikorno i svrsishodno opremi. Vjerujem da je to u potpunosti i uspjelo. S moje strane zahvaljujem izdavaču na trudu i brizi, kao i na prisnoj suradnji i nesmetanom odvijanju korektura.

Zagreb, u ljetu 1963. *H. Požar*

Sadržaj

PRVO POGLAVLJE

Strana

Karakteristike opterećenja u elektroenergetskom sistemu 1
1. Dnevni dijagram opterećenja 1
a) Osnovni pojmovi 1
b) Podjela dnevnog dijagrama opterećenja 2
c) Aproksimacija dnevne krivulje trajanja opterećenja 4
d) Krivulja energija—snaga 8
e) Konzumni okvir 10
2. Mjesečne krivulje trajanja opterećenja 11
a) Pojednostavljenja 11
b) Aproksimacija mjesečne krivulje trajnanja opterećenja 13
c) Mjesečna krivulja energija—snaga i mjesečni konzumni okvir.... 15
3. Varijacije potrošnje tokom godine 16
a) Varijacije potrošnje radi porasta 16
b) Sezonske varijacije potrošnje 20
c) Ukupne varijacije potrošnje 24
d) Određivanje varijacija ostalih karakteristika potrošnje 25

DRUGO POGLAVLJE

Osnovne karakteristike hidroelektrana i termoelektrana 26
1. Energetske karakteristike elektrana 26
2. Snaga i moguća proizvodnja hidroelektrana 28
3. Podjela moguće proizvodnje na varijabilnu i konstantnu energiju hidroelektrana 29
a) Maksimalno potrebna energetska vrijednost akumulacije 30
b) Moguća proizvodnja varijabilne i konstantne energije 34
c) Dnevne i mjesečne količine varijabilne i konstantne energije .. 39
d) Korištenje varijabilne energije 41
e) Određivanje moguće proizvodnje u razdoblju velikih i malih opterećenja 42
4. Utjecaj uzvodnih akumulacija na proizvodnju varijabilne i konstantne energije 43
a) Potrebna energetska vrijednost nizvodne akumulacije 44
b) Maksimalno potrebni volumen akumulacije 65
c) Određivanje količine varijabilne i konstantne energije 67
d) Lanac više hidroelektrana 87
e) Potrebna energetska vrijednost akumulacije za međusobno udaljene hidroelektrane 87
f) Promjenljivost omjera dotoka 94

Strana

5. Prilagođavanje elektrana dijagramu opterećenja 94
6. Troškovi u elektranama 99

TREĆE POGLAVLJE

Snaga i energija — uloga elektrana u elektroenergetskom sistemu 102
1. Elektroenergetski sistem termoelektrana 102
2. Elektroenergetski sistem termoelektrana i protočnih hidroelektrana.. 104
3. Elektroenergetski sistem termoelektrana i akumulacionih hidroelektrana 106
4. Napomene uz prikazanu ulogu elektrana..... 110

ČETVRTO POGLAVLJE

Iskorištenje raspoložive snage i energije iz hidroelektrana i određivanje potrebne snage i proizvodnje termoelektrana 112
1. Potreba analize 112
2. Metoda konzumnog okvira 112
   a) Popunjavanje dnevnog konzumnog okvira 112
   b) Popunjavanje mjesečnog konzumnog okvira 113
3. Metoda konstantne i varijabilne energije 118
   a) Općenito 118
   b) Mogući slučajevi i izrada elektroenergetskih bilanca 125
   c) Napomene uz metodu konstantne i varijabilne energije 137

PETO POGLAVLJE

Karakteristike mogućnosti hidroelektrana i opterećenja termoelektrana u kombiniranom elektroenergetskom sistemu 155
1. Karakteristične godine kao osnova za elektroenergetske analize.. 155
   a) Karakteristična srednja godina 155
   b) Karakteristična sušna godina 157
2. Krivulje vjerojatnosti moguće proizvodnje i snaga hidroelektrana.. 160
   a) Određivanje krivulje vjerojatnosti 160
   b) Upotreba krivulja vjerojatnosti 166
3. Krivulje opterećenja termoelektrana 167
   a) Krivulje trajanja opterećenja termoelektrana 167
   b) Sređeni dijagrami dnevnih maksimalnih opterećenja termoelektrana 170
   c) Određivanje promjenljivih troškova u termoelektranama 173
4. Prilike u kritičnom razdoblju za elektroenergetski sistem 174
5. Rezerva snage u elektroenergetskom sistemu 177

ŠESTO POGLAVLJE

Sigurnost opskrbe potrošača 180
1. Mane i prednosti ograničenja potrošnje električne energije 180
2. Uvjet za postizanje optimalnog opsega redukcija 181
3. Određivanje optimalnog opsega redukcije 190
4. Utjecaj prilika u elektroenergetskom sistemu na opseg redukcije.. 199
5. Utjecaj elektroenergetskog sistema na velike potrošače koji se povremeno reduciraju 199

SEDMO POGLAVLJE

Strana

Energetska vrijednost hidroelektrana 208
1. Osnova za određivanje energetske vrijednosti hidroelektrana 208
a) Vrijednost hidroelektrane s obzirom na troškove 208
b) Vrijednost hidroelektrane s obzirom na investicije 213
c) Vrijednost hidroelektrane s obzirom na zbroj investicija i pogonskih troškova 213
d) Napomene uz određivanje vrijednosti hidroelektrana 214
2. Određivanje iskoristive snage hidroelektrana u kritičnom razdoblju 215
3. Postupak za određivanje mogućnosti plasmana energije iz promatrane hidroelektrane 218
a) Određivanje plasmana hidroenergije za pojedine slučajeve 218
b) Određivanje plasmana energije iz promatrane hidroelektrane .. 225
4. Određivanje promjenljivih troškova za proizvodnju u termoelektranama koja je eliminirana radi promatrane hidroelektrane 227

OSMO POGLAVLJE

Korištenje sezonskih akumulacionih bazena hidroelektrana 231
1. Općenito 231
2. Neki kriteriji za korištenje akumulacionih bazena hidroelektrana .. 232
a) Kriterij izravnanja proizvodnje u akumulacionim hidroelektranama 232
b) Kriterij štednje goriva u termoelektranama 237
c) Kriterij sigurnosti opskrbe potrošača 238
d) Kriterij izravnanja proizvodnje termoelektrana 238
e) Usporedba kriterija 240
3. Primjena kriterija izravnanja proizvodnje termoelektrana 246

DEVETO POGLAVLJE

Instalirana snaga hidroelektrana i veličina akumulacionog bazena 254
1. Specifične i dodatne specifične investicije hidroelektrana 254
a) Specifične investicije 254
b) Dodatne specifične investicije 256
2. Optimalna instalirana snaga hidroelektrane 262
a) Određivanje optimalne instalirane snage hidroelektrane 262
b) Napomene uz određivanje optimalne instalirane snage 273
α) Međusobni odnos snage P_{io} (sl. 153) i optimalne instalirane snage P_{iopt} 273
β) Instalirana snaga i uloga hidroelektrana 273
γ) Prilike nakon iscrpljenja iskoristivih vodenih snaga 276
3. Određivanje optimalnog volumena akumulacionog bazena 278
a) Općenito 278
b) Optimalni volumen akumulacije za hidroelektranu s tlačnim vodom 280
c) Optimalni volumen akumulacije za hidroelektranu s gravitacionim dovodom 285

DESETO POGLAVLJE

Strana

Vrijednost gubitaka u prijenosu i transformaciji 286
1. Gubici snage i energije 286
2. Utjecaj gubitaka na prilike u elektroenergetskom sistemu 289
   a) Potrebna dodatna snaga za nadoknadu gubitaka 290
   b) Potrebna dodatna proizvodnja za nadoknadu gubitaka 299
3. Vrijednost gubitaka 303
4. Optimalni presjek voda 304
   a) Uvjet minimuma troškova u sistemu 304
   b) Utjecaj na optimalni presjek vodiča 308
   c) Utjecaj gubitaka prijenosa u mreži sistema 310

JEDANAESTO POGLAVLJE

Opterećenje u elektroenergetskom sistemu 315
1. Općenito 315
2. Djelatno opterećenje vodova 315
3. Jalovo opterećenje vodova 322
   a) Granice opterećenja generatora 322
   α) Dijagrami snaga 322
   β) Konstrukcija pogonske karte 329
   b) Granice jalovog opterećenja u čvorovima 337

DVANAESTO POGLAVLJE

Najpovoljniji momenat stavljanja u pogon hidroelektrane u ovisnosti o razvoju konzuma 340
1. Uvodne napomene 340
2. Prilike u elektroenergetskom sistemu kao funkcija konzuma 341
3. Udređivanje najpovoljnijeg momenta za izgradnju nove hidroelektrane 347

Literatura 353

Oznake upotrebljene u formulama 355

PRVO POGLAVLJE

KARAKTERISTIKE OPTEREĆENJA U ELEKTROENERGETSKOM SISTEMU

1. Dnevni dijagram opterećenja

a) Osnovni pojmovi

Dnevni dijagram opterećenja predstavlja promjene opterećenja tokom dana, a njegov oblik ovisi o strukturi potrošača u elektroenergetskom sistemu.

U elektroenergetskom sistemu dnevni dijagram opterećenja je zbroj dnevnih dijagrama opterećenja pojedinih elektrana bilo da je opterećenje mjereno na pragu elektrana bilo na priključnicama generatora. Ako je dijagram određen kao zbroj potražnje potrošača, govorimo o dnevnom dijagramu potražnje. U prvom slučaju u dijagram su uključeni gubici u mreži, odnosno gubici u mreži i vlastiti potrošak u elektranama, dok je u dnevnom dijagramu potražnje samo snaga i energija, koju su preuzeli potrošači.

Pri analizi prilika u elektroenergetskom sistemu, najpogodnije je razmatranja bazirati na dijagramima opterećenja na pragu elektrana. Na taj način eliminira se utjecaj vlastitog potroška, koji je relativno veliki u termoelektranama, a vrlo mali u hidroelektranama. Budući da se udio hidroelektrana u ukupnoj proizvodnji tokom godine mijenja u vrlo širokim granicama, za razmatranja, koja se osnivaju na dijagramima opterećenja na stezaljkama generatora, bilo bi potrebno unaprijed pretpostaviti udio hidroelektrana u ukupnoj proizvodnji. Radi toga kad se bude govorilo o dijagramu opterećenja, a da se posebno ne naglasi o kakvom se dijagramu opterećenja radi, treba smatrati da je riječ o dijagramu opterećenja na pragu elektrana.

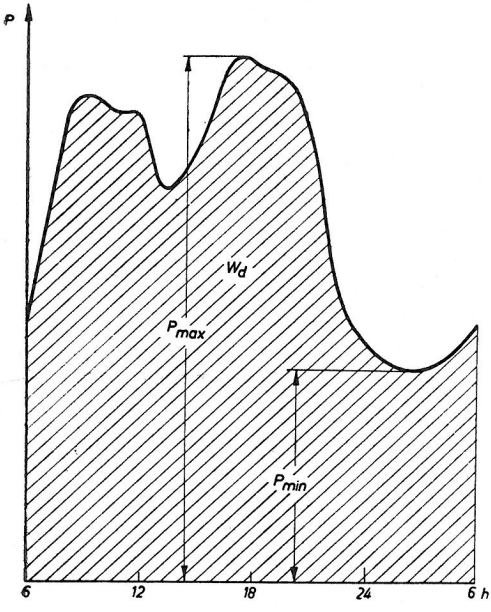
U dnevnom dijagramu opterećenja (sl. 1) razlikujemo tri osnovne veličine: maksimalno dnevno opterećenje (P_{max}), minimalno dnevno opterećenje (P_{min}) i dnevnu proizvodnju energije (W_d). Pored toga možemo definirati dvije relativne karakteristične veličine: faktor opterećenja i omjer između minimalnog i maksimalnog opterećenja. Faktor opterećenja

$$m = \frac{W_d}{24\, P_{max}} \tag{1}$$

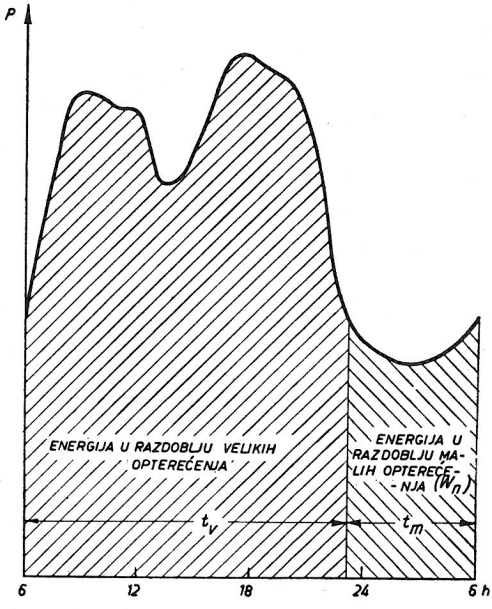
predstavlja omjer između proizvedene energije i energije koja bi se mogla proizvesti maksimalnim opterećenjem u toku 24 sata. Omjer između minimalnog i maksimalnog opterećenja definiran je relacijom

$$m_o = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} \tag{2}$$

I faktor opterećenja i omjer minimalnog i maksimalnog opterećenja ovise o strukturi potrošača u elektroenergetskom sistemu. Faktor opterećenja obično je tim veći što je udio industrije u ukupnoj



Sl. 1. Dnevni dijagram opterećenja



Sl. 2. Podjela dnevnog dijagrama opterećenja na razdoblja velikih i malih opterećenja

potrošnji električne energije veći, a pogotovo je velik, ako među industrijskim potrošačima značajno mjesto zauzimaju potrošači koji tokom cijelog dana rade s konstantnim ili približno konstantnim opterećenjem (elektrolize aluminija, lučne peći i sl.).

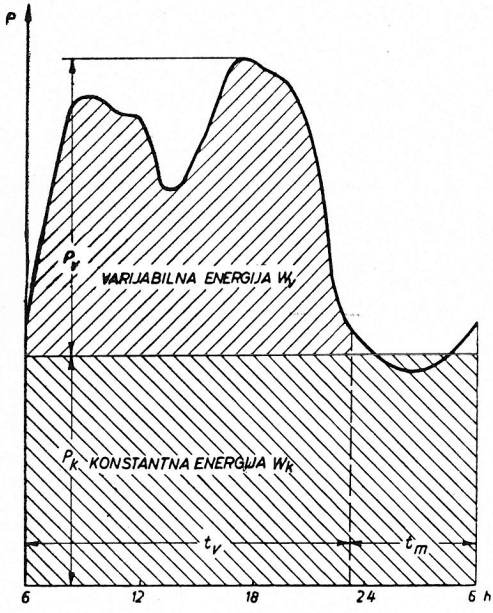
b) Podjela dnevnog dijagrama opterećenja

Dnevni dijagram opterećenja možemo podijeliti na dva razdoblja: razdoblje velikih opterećenja i razdoblje malih opterećenja (sl. 2). Granica između ta dva razdoblja nije tačno definirana, a trajanje tih razdoblja ovisi o obliku dnevnog dijagrama odnosno o karakteristikama potrošača u sistemu. Trajanje razdoblja malih opterećenja iznosi nekoliko sati, što je ovisno i o godišnjem dobu.

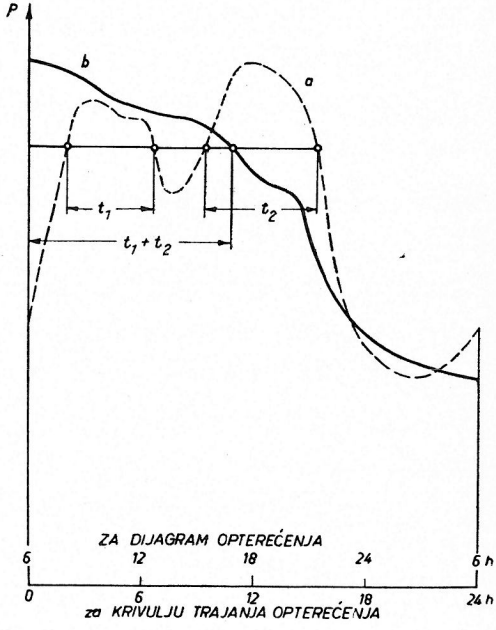
Spomenuta podjela dovodi nas na podjelu dnevnog dijagrama opterećenja na konstantnu i varijabilnu energiju (sl. 3). Polazna tačka (sl. 2) za podjelu je energija u razdoblju malih opterećenja (W_n) trajanje malih opterećenja (t_m), pomoću kojih se veličina određuje konstantno opterećenje

$$P_k = \frac{W_n}{t_m} \tag{3}$$

Konstantno opterećenje definirano relacijom (3) predstavlja srednje opterećenje u razdoblju malih opterećenja, a ono je veće od minimalnog opterećenja ($P_{\min}$). Ta razlika ovisi o obliku dijagrama opterećenja i o vremenu trajanja razdoblja malih opterećenja. Zamjenom dijela



Sl. 3. Podjela dnevnog dijagrama opterećenja na varijabilnu i konstantnu energiju



Sl. 4. Dnevni dijagram (*a*) i dnevna krivulja trajanja opterećenja (*b*)

dijagrama opterećenja u razdoblju malih opterećenja horizontalnim pravcem čini se greška, koja nije velika, ali takva aproksimacija donosi znatne prednosti — kako će se kasnije vidjeti — za analizu prilika u elektroenergetskom sistemu.

Koristeći konstantno opterećenje određeno relacijom (3) možemo odrediti dnevnu konstantnu energiju (sl. 3)

$$W_k = 24\, P_k \tag{4}$$

dok ostatak potrebne energije tokom dana, koji nazivamo varijabilnom

energijom (W_v), jer je za njezinu proizvodnju potrebna promjenljiva snaga, sada možemo odrediti iz izraza

$$W_v = W_d - 24\,P_k \tag{5}$$

Za proizvodnju varijabilne energije potrebna je varijabilna snaga

$$P_v = P_{\max} - P_k \tag{6}$$

Podjelom dnevnog dijagrama opterećenja na konstantnu i varijabilnu energiju, dijagram opterećenja karakteriziran je trima veličinama (na primjer W_d, $P_{\max}$, P_k), jer su ostale veličine tim već određene.

c) Aproksimacija dnevne krivulje trajanja opterećenja

Često nas, međutim, ne interesira, u kojem satu nastupa maksimalno i minimalno opterećenje, niti koliko je opterećenje, na primjer, u 17 sati, pa je tada pogodnije, umjesto dnevnog dijagrama opterećenja, upotrijebiti dnevnu krivulju trajanja opterećenja. Na sl. 4 prikazana je konstrukcija krivulje trajanja iz zadanog dijagrama opterećenja.

Upotreba krivulje trajanja naročito je pogodna, jer se može jednostavno aproksimirati i na taj način doći do jednostavnijeg njenog oblika.

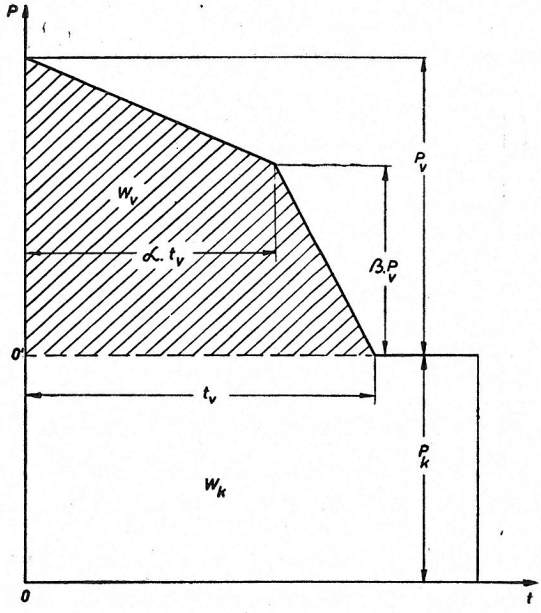
Poznata je aproksimacija simboličkom krivuljom [1], koja se može prikazati u obliku [2]

$$\frac{P}{P_{\max}} = 1 - (1 - m_o)\left(\frac{t}{24}\right)^{\frac{m-m_o}{1-m}} \tag{7}$$

gdje je t broj sati trajanja, a $P_{\max}$, m i m_o veličine definirane u odjeljku (a) ovog poglavlja. Simbolička krivulja odnosi se obično na godinu [3], ali u pomanjkanju druge aproksimacije neki put se ona upotrebljava i za aproksimaciju dnevne krivulje trajanja, pogotovo kad se uzme u obzir sličnost dnevne i godišnje krivulje trajanja [3]. Međutim — kako će se vidjeti iz primjera na sl. 7a do 7e — ona u mnogo slučajeva ne može poslužiti za tu aproksimaciju u velikim elektroenergetskim sistemima.

Radi toga je potrebno potražiti neku bolju, a istodobno i jednostavnu, aproksimaciju dnevne krivulje trajanja, koja odgovara velikim elektroenergetskim sistemima. Takvu aproksimaciju možemo ostvariti ako se pođe od podjele na konstantnu i varijabilnu energiju. Već smo spomenuli da dio dijagrama opterećenja u razdoblju malih opterećenja (t_m) možemo zamijeniti horizontalnim pravcem, pa je to ujedno i krajnji desni dio dnevne krivulje trajanja (sl. 5), od $t_v = 24 - t_m$ do 24 sata, koji kao ordinatu ima snagu P_k (3). Ostali dio krivulje možemo aproksimirati daljnjim dvama pravcima od kojih jedan prolazi kroz tačku (t_v, P_k), a drugi kroz tačku (O, $P_{\max}$), dok njihovo sjecište ima koordi-

nate at_v i $P_k + \beta P_v$ (sl. 5). Polazeći od zahtjeva da količina varijabilne energije u aproksimiranoj krivulji trajanja bude jednaka količini te energije u stvarnoj krivulji trajanja, dolazimo do relacije



Sl. 5. Aproksimacija dnevne krivulje trajanja trima pravcima

$$W_v = \frac{1}{2}\left[\alpha t_v P_v (1-\beta) + \beta t_v P_v (1+\alpha)\right] \tag{8}$$

odakle dobivamo, da je

$$\alpha + \beta = \frac{2 W_v}{t_v P_v} \tag{9}$$

Postavivši da je

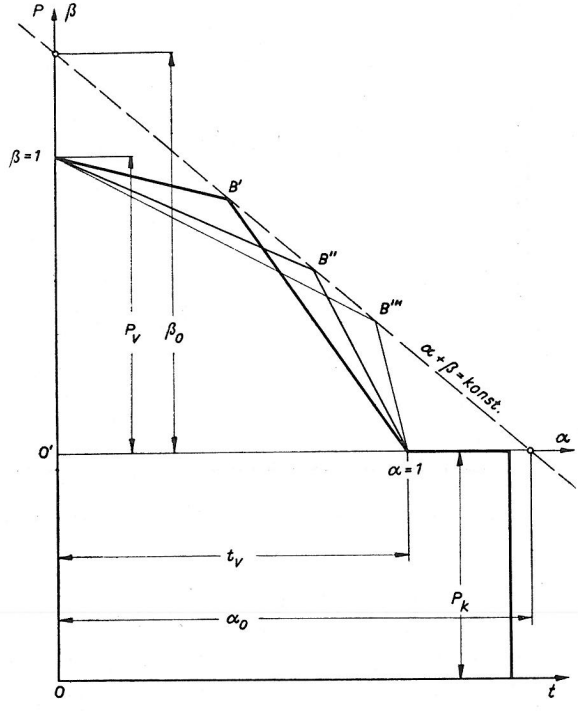
$$m'_o = \frac{P_k}{P_{\max}} \tag{10}$$

te uzevši u obzir relacije (1) i (4), dobivamo

$$\alpha + \beta = \frac{48}{t_v} \frac{m - m'_o}{1 - m'_o} \tag{11}$$

Odnos (10) ima isto značenje kao odnos (2), ali s tim da je — radi učinjene aproksimacije — m_o' nešto veći od m_o.

Teorijski promatrano, najveća količina varijabilne energije, koja se — uz učinjene pretpostavke — može ostvariti iznosi $W_{v\,max}=t_v P_v$, pa tada i zbroj $\alpha + \beta$ postiže — prema (9) — najveću vrijednost ($\alpha + \beta = 2$). U tom slučaju krivulja trajanja je predstavljena sa dva horizontalna pravca i to od $t = 0$ do $t = t_v$ pravcem $P = P_{max}$, a od



Sl. 6. Konstrukcija aproksimacije dnevne krivulje trajanja trima pravcima

$t = t_v$ do $t = 24$ pravcem $P = P_k$. S druge strane, najmanja količina varijabilne energije je $W_{v\,min} = 0$, pa je tada i $\alpha + \beta = 0$. Budući da ni α ni β ne mogu biti negativni, krivulja je trajanja prikazana pravcem $P = P_{max}$ odnosno $P_k = P_{max}$ za cijeli interval od $t = 0$ do $t = 24$. U praksi se neće nikada moći ostvariti spomenuti granični slučajevi, pa se može postaviti da je

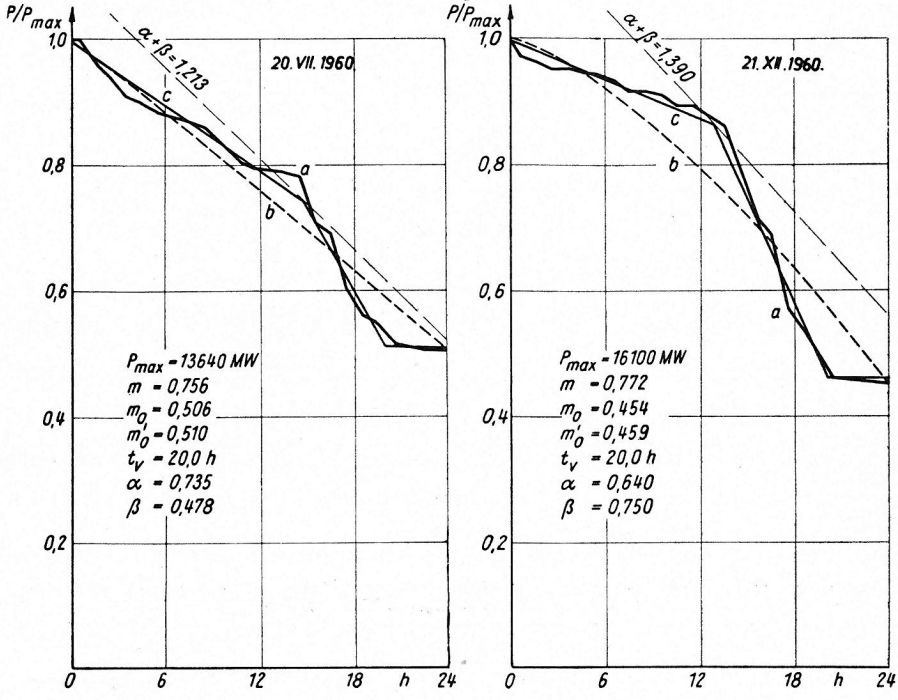
$$0 < (\alpha + \beta) < 2 \tag{12}$$

Jednadžba (9) odnosno (11) predstavlja pravac u koordinatnom sistemu (α, β), koji ima ishodište u točki O' (sl. 5). Na apscisi za $\alpha = 1$

imamo dužinu t_v, a na ordinati za $\beta = 1$ dužinu P_v. Odsječci na novim koordinatnim osima (sl. 6) su

$$\alpha_o = \beta_o = \frac{48}{t_v} \frac{m - m'_o}{1 - m'_o} \tag{13}$$

Pravac, određen jednadžbom (9) u novom koordinatnom sistemu (α, β), geometrijsko je mjesto sjecišta pravaca, kojima je aproksimiran varijabilni dio krivulje trajanja, a koja aproksimacija zadovoljava

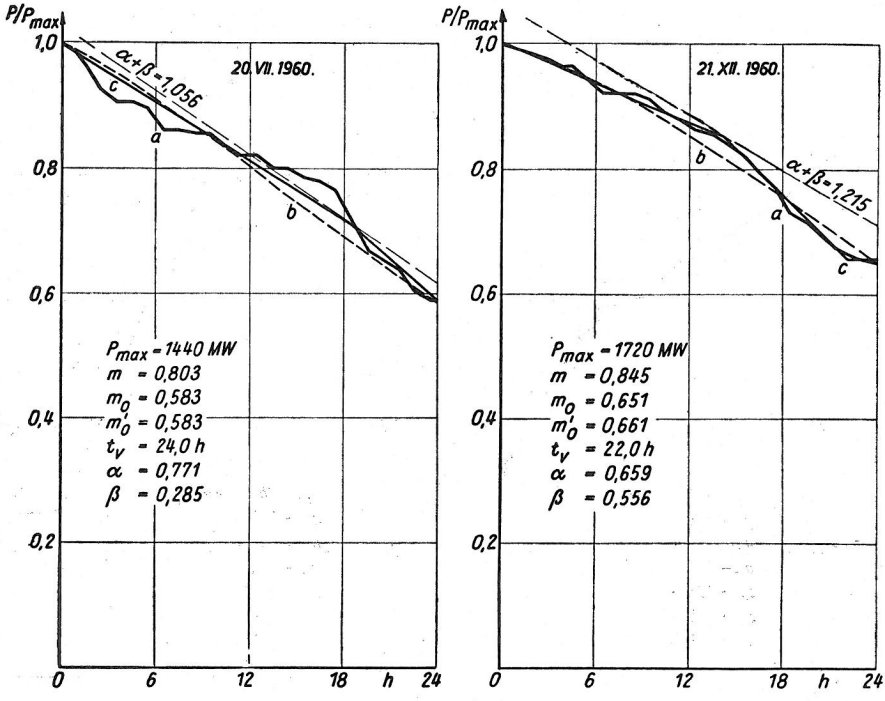


Sl. 7a. Dnevne krivulje trajanja (*a*) i njihove aproksimacije (*b*) prema formuli (7) i (*c*) pomoću triju pravaca za elektroenergetski sistem Zap. Njemačke

uvjet (9), kao i uvjete da količina energije, kao i maksimalno opterećenje, odgovara veličinama stvarne krivulje trajanja.

Da bi se aproksimirala krivulja trajanja trima pravcima, potrebno je, dakle, prema obliku stvarne krivulje trajanja odabrati trajanje razdoblja malih opterećenja (t_m), čime je (3) određeno konstantno opterećenje (P_k) i trajanje razdoblja velikih opterećenja (t_v) te omjer (m'_o) prema (10). Iz tih veličina i poznatog faktora opterećenja (m) određuje se tada prema (11) zbroj ($\alpha + \beta$), što omogućuje konstrukciju pravca $\alpha + \beta =$ konst, pomoću kojeg se određuje tačka B (sl. 6) koja najbolje odgovara promatranoj krivulji trajanja.

Ako se u promatranom elektroenergetskom sistemu poznaje dosadašnji razvoj karakterističnih veličina u pojedinim razdobljima godine, postoji mogućnost i ocjene razvoja u budućnosti, pa prema tome i za aproksimaciju budućih dnevnih krivulja trajanja.



Sl. 7b. Dnevne krivulje trajanja (*a*) i njihove aproksimacije (*b*) prema formuli (7) i (*c*) pomoću triju pravaca za elektroenergetski sistem Austrije

Da bi se pokazalo koliko se aproksimacije krivulja trajanja razlikuju od ostvarenih krivulja trajanja, prikazane su stvarne i aproksmirane krivulje trajanja za jedan zimski i jedan ljetni dan u elektroenergetskim sistemima SR Njemačke [4] na sl. 7a, Austrije [5] na sl. 7b, Francuske [4] na sl. 7c, Italije [4] na sl. 7d i Jugoslavije [6] na sl. 7e. U svim je slučajevima $t_v = 20$ h, dok se u slučaju Austrije postiže najbolja aproksimacija za $t_v = 24$ h. i za $t_v = 22$ h.

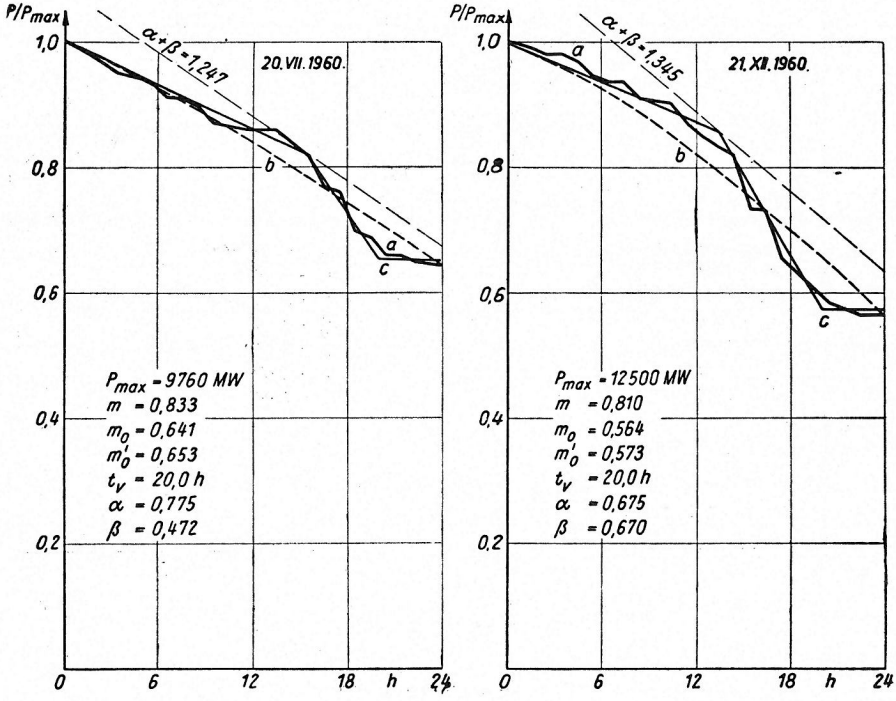
d) Krivulja energija-snaga

U dijagramu opterećenja kao i u krivulji trajanja energija je prikazana površinom, što je u većini slučajeva nepogodno za daljnje analize. Radi toga se prelazi na prikazivanje dijagrama opterećenja

i krivulja trajanja pomoću krivulja energija-snaga (sl. 8), da bismo energiju prikazali dužinama. Krivulju energija-snaga definiramo integralom

$$W = f(P) = \int_{O}^{P} t \, dP \tag{14}$$

kojega određujemo bilo planimetriranjem bilo integriranjem analitičkog izraza. Za opterećenja od 0 do $P_{\min}$ je $W = f(P)$ pravac određen jednadžbom $W = 24\,P$, a za opterećenja $P > P_{\min}$ krivulja sa sve manjim nagibom tangente prema osi apscisa.



Sl. 7c. Dnevne krivulje trajanja (*a*) i njihove aproksimacije (*b*) prema formuli (7) i (*c*) pomoću triju pravaca za elektroenergetski sistem Francuske

Za krivulju trajanja aproksimiranu trima pravcima (sl. 5) analitički izraz za krivulju energija-snaga za područje $O \leqq P \leqq P_k$ glasi

$$W = 24\,P \tag{15}$$

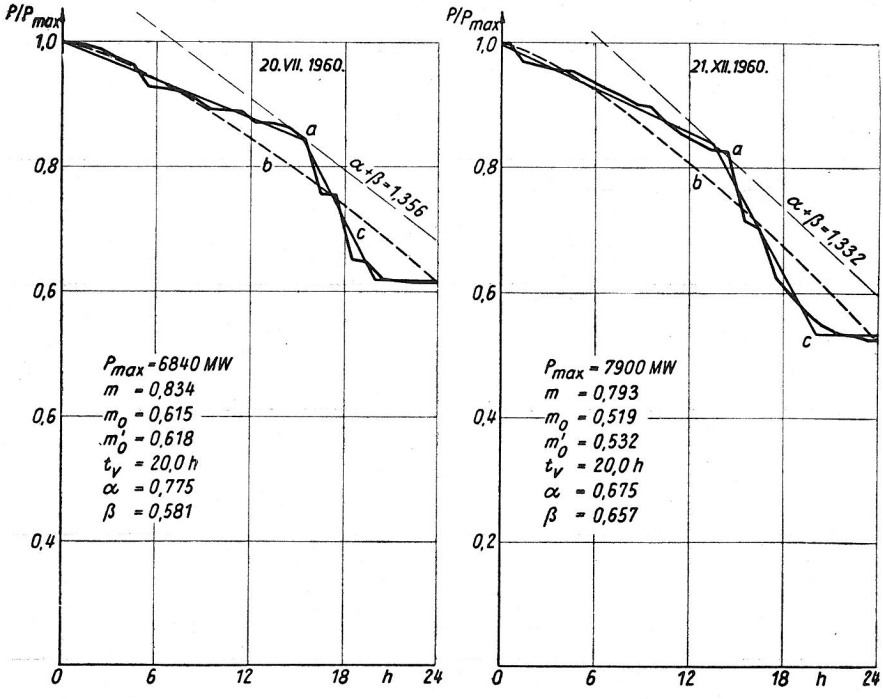
za opterećenja $P_k \leqq P \leqq (P_k + \beta\,P_v)$ je

$$W = 24\,P_k + t_v\,(P - P_k)\left(1 - \frac{P - P_k}{P_v} \cdot \frac{1-\alpha}{2\,\beta}\right) \tag{16}$$

dok je za $(P_k + \beta P_v) \leqq P \leqq (P_k + P_v)$ analitički izraz za krivulju energija — snaga

$$W = 24 P_k + \frac{1}{2} t_v (1 + \alpha) \beta P_v +$$

$$+ \frac{1}{2} \alpha t_v (P - P_k - \beta P_v) \left[1 - \frac{P - P_k - P_v}{(1 - \beta) P_v} \right] \qquad (17)$$



Sl. 7d. Dnevne krivulje trajanja (*a*) i njihove aproksimacije (*b*) prema formuli (7) i (*c*) pomoću triju pravaca za elektroenergetski sistem Italije

e) Konzumni okvir

Krivulja energija-snaga traži za svaki dan poseban dijagram, pa prikaz prilika u većem broju dana (mjesec ili godina) zahtijeva znatan prostor. Osim toga, takav prikaz onemogućuje preglednost. Prelazom od krivulje energija-snaga na konzumni okvir [7], [8], [9] eliminiraju se te mane. Radi prikazivanja odnosa energije i snage u dnevnom konzumnom okviru, na ordinatu se nanose i energija i snage, dok je jedinica na apscisi jedan dan. Konstrukcija i primjer dnevnog konzumnog okvira prikazani su na sl. 9. Postavljanjem konzumnih okvira za pojedine dane jedan do drugoga, dobiva se konzumni okvir za tjedan, mjesec ili godinu.

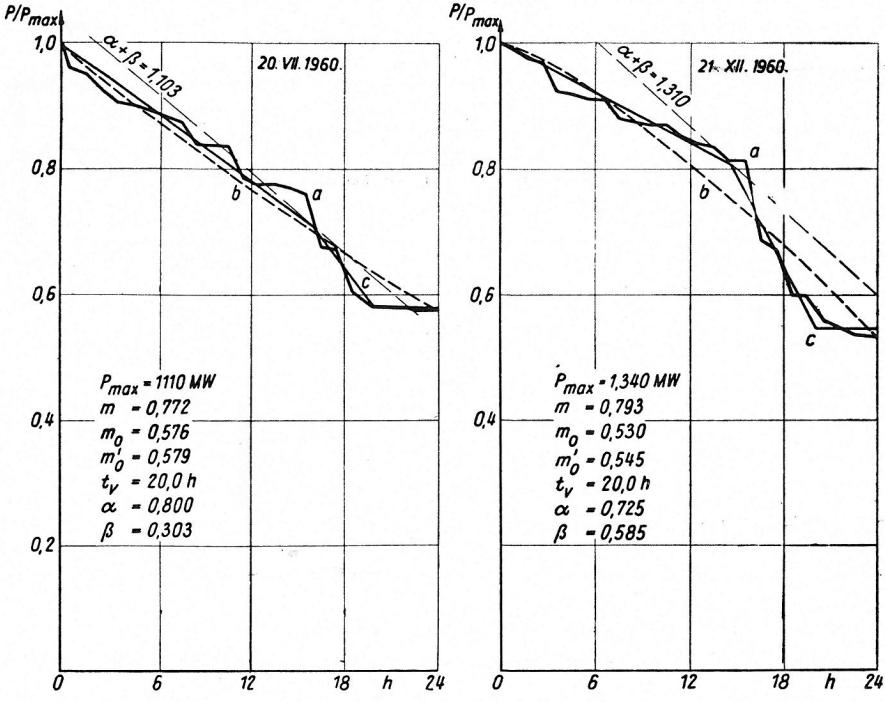
2. Mjesečne krivulje trajanja opterećenja

a) Pojednostavljenja

Analiza prilika u elektroenergetskom sistemu na osnovu dnevnih dijagrama opterećenja ili na osnovu dnevnih krivulja trajanja zahtijevala bi dugotrajan rad, pa se radi toga često provodi na temelju mjesečnih krivulja trajanja opterećenja.

Pri prijelazu od dnevnih na mjesečne krivulje trajanja pojavljuju se, međutim, dvije poteškoće: mjeseci s različitim brojem dana, te razlika između krivulja trajanja opterećenja u radnim danima i krivulja trajanja u neradnim danima.

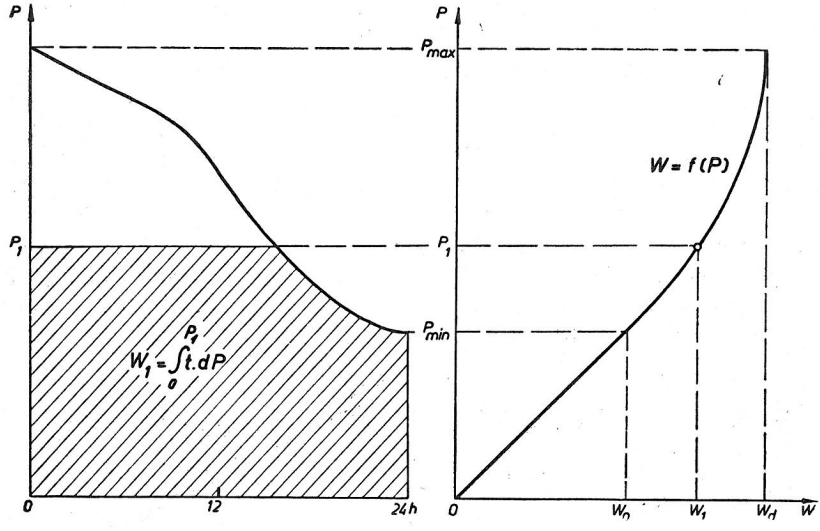
Prvu teškoću možemo savladati na taj način što se račun provodi uz pretpostavku da su svi mjeseci u godini međusobno jednaki i da svaki mjesec traje 730 sati, jer je $12 \cdot 730 = 8760$ sati, dakle, upravo onoliko koliko sati ima godina.



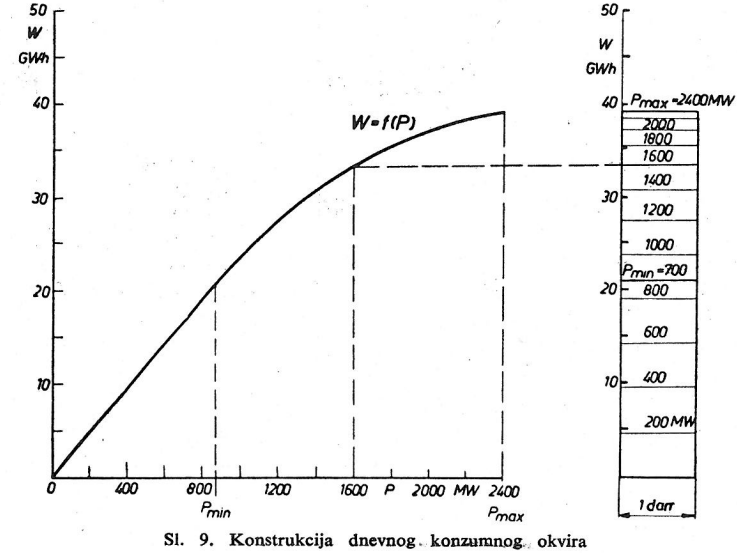
Sl. 7e. Dnevne krivulje trajanja (*a*) i njihove aproksimacije (*b*) prema formuli (7) i (*c*) pomoću triju pravaca za elektroenergetski sistem Jugoslavije

Drugu poteškoću možemo otkloniti dvjema pretpostavkama: prvom, da su svi radni dani u mjesecu međusobno jednaki, i drugom, da u neradnim danima nije potrebna varijabilna energija.

Uvažavajući prvu pretpostavku potrebno je odrediti srednju krivulju trajanja opterećenja u radnim danima. Nju određujemo zbrajanjem trajanja opterećenja, pa tako ostaje sačuvano maksimalno



Sl. 8. Konstrukcija krivulje energija-snaga $W = f(P)$



Sl. 9. Konstrukcija dnevnog konzumnog okvira

opterećenje koje se je pojavilo tokom mjeseca. Tako određena krivulja trajanja opterećenja u radnom danu predstavlja nešto teže prilike od onih koje treba očekivati, jer se maksimalno mjesečno opterećenje

neće pojaviti u svakom radnom danu. Ali takva pretpostavka predstavlja pogrešku koja analizama zadovoljenja potražnje daje izvjesnu sigurnost.

Druga je mogućnost da pretpostavimo da su svi radni dani u mjesecu jednaki prosječnom radnom danu u promatranom mjesecu. Tada dolazimo do nešto nižeg maksimalnog opterećenja od onog koje se je pojavilo ili koje će se pojaviti u tom mjesecu. Ako se radi o određivanju prilika u budućnosti to je praktički jedina mogućnost, jer se tako fine razlike ne mogu ni predvidjeti.

Računanjem s konstantnim opterećenjem u neradnim danima unosimo daljnju pogrešku u račun. Maksimalna opterećenja i ukupne potrebe energije u neradnim danima su manja nego u radnim danima, pa je sigurno da će se u neradnim danima moći zadovoljiti potražnja, ako je već zadovoljena u radnim danima.

Dalje pojednostavljenje može se postići pretpostavkom da je u svim mjesecima broj radnih dana (r) međusobno jednak, ali nema nikakvih zapreka da se za svaki mjesec posebno odredi broj radnih dana. U svim slučajevima, međutim, mora biti ispunjena relacija

$$24\,(r+n) = 730 \tag{18}$$

gdje je (n) broj neradnih dana u mjesecu.

Treba napomenuti da je mjesec od 730 sati svakako fiktivan mjesec, jer nema cijeli broj dana. Ta činjenica ne stvara teškoće u elektroenergetskim analizama. Može se, naime, prepotstaviti i takva podjela na radne i neradne dane, a da ni broj radnih ni broj neradnih dana ne bude cijeli broj.

b) Aproksimacija mjesečne krivulje trajanja opterećenja

Uz navedena pojednostavljenja moguće je jednostavno konstruirati mjesečnu krivulju trajanja opterećenja aproksimiranu trima pravcima, koja u varijabilnom dijelu ima isti oblik kao i u aproksimiranoj dnevnoj krivulji trajanja s razlikom da su apscise množene s brojem radnih dana (r) u mjesecu. Pri tome treba uzeti u obzir da konstantno opterećenje traje 730 sati, odnosno $24\,(r+n)$ sati.

Pri razmatranju prilika u elektroenergetskom sistemu često polazimo od mjesečnih potreba energije (W_m), pa je potrebno za tu količinu energije konstruirati aproksimaciju krivulje trajanja opterećenja. U tu svrhu potrebno je poznavati dva odnosa: omjer između potreba energije u neradnom danu (W_{dn}) i potreba energije u radnom danu (W_d)

$$w_n = \frac{W_{dn}}{W_d} \tag{19}$$

te omjer između potreba varijabilne (W_v) i ukupne energije (W_d) u radnom danu

$$w_v = \frac{W_v}{W_d} \tag{20}$$

Omjer w_n ovisi o strukturi potrošnje u elektroenergetskom sistemu, a naročito o udjelu u ukupnoj potrošnji onih potrošača koji rade bez tjednog prekida rada. Taj omjer iznosi, na primjer, u elektroenergetskom sistemu Francuske oko 0,63 (osim u ljetnim mjesecima, julu i augustu, kad je nešto viši radi obustave rada nekih tvornica), u elektroenergetskom sistemu Švicarske između 0,68 i 0,72, a u elektroenergetskom sistemu Jugoslavije između 0,74 i 0,80. Ovi se podaci odnose na omjere w_n između srednje srijede u mjesecu i nedjelje nakon te srijede za razdoblje od nekoliko posljednjih godina.

Omjer w_v također ovisi o strukturi potrošnje, ali na njegovu veličinu ima naročitog utjecaja postojanje velikih potrošača, koji rade s praktički konstantnim opterećenjem. Tako, na primjer, u elektroenergetskom sistemu SR Njemačke omjer w_v se kreće između 0,33 i 0,41, u Austriji od 0,18 do 0,29, u Švicarskoj od 0,18 do 0,26, u Francuskoj od 0,20 do 0,29, u Italiji od 0,26 do 0,35, a u Jugoslaviji od 0,25 do 0,32. Naravno da omjer w_v ovisi o godišnjem dobu, pa je normalno u zimskim mjesecima veći nego u ljetnim.

Međutim, ako se želi analizirati utjecaj godišnjeg doba na omjere w_n i w_v, potrebno je od ostvarene potrošnje odbiti potrošače koji samo povremeno rade (na primjer elektrokotlovi, potrošači koji se obustavljaju u razdoblju nepovoljnih energetskih prilika i sl.), te njihov utjecaj posebno analizirati.

Polazeći od mjesečnih potreba energije (W_m), a poznavajući omjere (19) i (20), dnevne potrebe energije u radnom danu određujemo iz relacije

$$W_d = \frac{W_m}{r + w_n n} \tag{21}$$

a odatle potrebnu varijabilnu energiju u radnom danu pomoću izraza (20). Prema tome, mjesečna je varijabilna energija

$$W_{mv} = r W_v \tag{22}$$

mjesečna konstantna energija

$$W_{mk} = W_m - W_{mv} \tag{23}$$

a mjesečno konstantno opterećenje

$$P_{mk} = \frac{W_{mk}}{24\,(r + n)} \tag{24}$$

Poznavajući faktor opterećenja (1) u radnom danu, određujemo P_{max}, a odatle i varijabilno opterećenje

$$P_{mv} = P_{\max} - P_{mk} \tag{25}$$

Mjesečno konstantno opterećenje (P_{mk}) određeno prema (24) razlikuje se od konstantnog opterećenje (P_k) određenog na temelju prilika u radnom danu. Relativna pogreška iznosi

$$p_k = \frac{P_{mk} - P_k}{P_k} \tag{26}$$

Uzevši u obzir relacije (20), (21) i (23), tu grešku možemo prikazati izrazom

$$p_k = \frac{n}{r+n}\left(\frac{w_n}{1-w_v} - 1\right) \tag{27}$$

Nema razlike između P_{mk} i P_k, ako je $w_n = 1 - w_v$, dok je pogreška tim veća čim se omjer $w_n/(1 - w_v)$ više razlikuje od 1.

Za aproksimaciju krivulje trajanja trima pravcima vrijedi i sada relacija (9), jer za mjesečnu krivulju trajanja treba i brojnik i nazivnik množiti brojem radnih dana. Analognim razmatranjem, kao za slučaj dnevne krivulje trajanja, zbroj $\alpha + \beta$ možemo prikazati i izrazom

$$\alpha + \beta = \frac{48\,(r+n)}{r t_v}\,\frac{m_m - m'_{om}}{1 - m'_{om}} \tag{28}$$

gdje je m_m mjesečni faktor opterećenja

$$m_m = \frac{W_m}{24\,(r+n)\,P_{\max}} \tag{29}$$

a m'_{om} omjer između konstantnog i maksimalnog opterećenja

$$m'_{om} = \frac{P_{mk}}{P_{\max}}\,. \tag{30}$$

Konstrukcija aproksimacije mjesečne krivulje trajanja prikazana je na sl. 10. Treba naglasiti da veličine α i β nemaju sada tačno istu vrijednost kao i za dnevnu krivulju trajanja.

c) Mjesečna krivulja energija-snaga i mjesečni konzumni okvir

Kao za dan, možemo i za mjesec odrediti krivulju energija-snaga, koja je također definirana izrazom (16).

Za aproksimiranu krivulju trajanja analitički izraz za krivulju energija-snaga u intervalu $O \leqq P \leqq P_{mk}$ glasi

$$W = 24\,(r+n)\,P \tag{15 a}$$

u intervalu $P_{mk} \leqq P \leqq (P_{mk} + \beta P_{mv})$ glasi

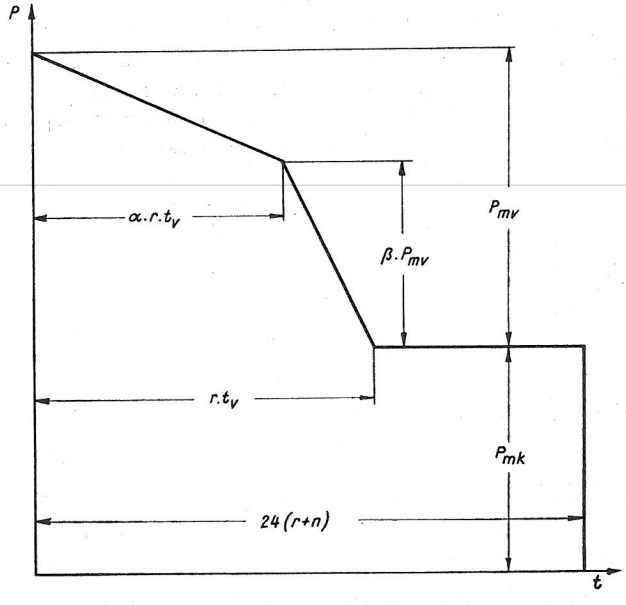
$$W = 24\,(r+n)\,P_{mk} + rt_v\,(P - P_{mk})\left(1 - \frac{P - P_{mk}}{P_{mv}}\,\frac{1-\alpha}{2\beta}\right) \qquad (16\,a)$$

dok za opterećenje $(P_{mk} + \beta P_{mv}) \leqq P \leqq (P_{mk} + P_{mv})$ dobivamo

$$W = 24\,(r+n)\,P_{mk} + \frac{1}{2}\,rt_v\,(1+\alpha)\,\beta\,P_{mv} +$$

$$+ \frac{1}{2}\,\alpha\,rt_v\,(P - P_{mk} - \beta\,P_{mv})\left[1 - \frac{P - P_{mk} - P_{mv}}{(1-\beta)\,P_{mv}}\right] \qquad (17\,a)$$

Pomoću krivulje energija-snaga konstruira se mjesečni konzumni okvir na isti način kao što je za dnevni konzumni okvir prikazano na sl. 9.



Sl. 10. Aproksimirana mjesečna krivulja trajanja opterećenja

3. Varijacije potrošnje tokom godine

a) Varijacije potrošnje radi porasta

Prilikom analize prilika u elektroenergetskom sistemu u budućnosti često polazimo od predviđene godišnje potrošnje u promatranoj godini. Tada smo suočeni s problemom da iz godišnje potrošnje odredimo mjesečne veličine, kako bismo mogli obaviti analizu. Treba napomenuti da u svim slučajevima, kad se radi o elektroenergetskim sistemima

u kojima hidroenergija ima neko značenje, razmatranje godine kao cjeline ne dovodi do rezultata. Naime, u godišnjim krivuljama trajanja opterećenja gubi se utjecaj godišnjih doba, a raspored proizvodnje hidroelektrana unutar godine ima odlučujući utjecaj na prilike u elektroenergetskom sistemu. Radi toga je potrebno poći od potražnje u pojedinim mjesecima.

Varijacije mjesečnih potrošnji unutar godine uglavnom su posljedica dvaju utjecaja: porasta potrošnje unutar godine i sezonske varijacije potrošnje. U pojedinim godinama pojavljuju se i drugi utjecaji (odstupanje od prosječnih mjesečnih temperatura i sl.), koji se ne mogu predvidjeti, pa se ne mogu ni uključiti u razmatranja.

Porast potrošnje je posljedica s jedne strane priključka novih potrošača, a s druge povećanja potrošnje već postojećih potrošača. Ni jedna ni druga pojava nije podvrgnuta nekoj zakonitosti, jer ovisi o nizu utjecaja, ali — ako se radi o velikom broju potrošača — postoji vjerojatnost da će se porast potrošnje raspodijeliti na cijelu godinu, odnosno postoji ista vjerojatnost da će se novi potrošač ili povećanje potrošnje postojećeg potrošača pojaviti početkom, sredinom ili krajem godine. Budući da se porast potrošnje električne energije u nizu godina odvija po eksponencijalnom zakonu, možemo tu zakonitost primijeniti i unutar jedne godine, ako se radi o većem porastu. Za manje poraste, a u većini slučajeva je to dovoljno, možemo unutar godine računati da se porast odvija po pravcu.

Kad ne bi postojali ni porast potrošnje ni njene sezonske varijacije, potrošnja tokom godine — uz pretpostavku da su svi mjeseci međusobno jednaki, odnosno da su svi dani međusobno jednaki — odvijala bi se po horizontalnom pravcu (sl. 11). Ako s W_{mo} označimo mjesečnu potrošnju u početku godine ($t = 0$), a s W_{m1} potrošnju krajem godine ($t = 1$), za porast (p) vrijedi relacija

$$W_{m1} = W_{mo}\,(1 + p) \tag{31}$$

dok je uz eksponencijalni porast tokom godine potrošnja u vremenu t

$$W_m = W_{mo}\,(1 + p)^t \tag{32}$$

Ako potrošnju prikažemo relativnim veličinama, koje su definirane odnosom $w'_p = W_m / \overline{W}_m$, gdje je $\overline{W}_m$ prosječna mjesečna potrošnja tokom godine, mora vrijediti relacija

$$\int_0^1 w'_p dt = 1 \tag{33}$$

pa je

$$w'_{po} = \frac{1}{p} \ln (1 + p) \tag{34}$$

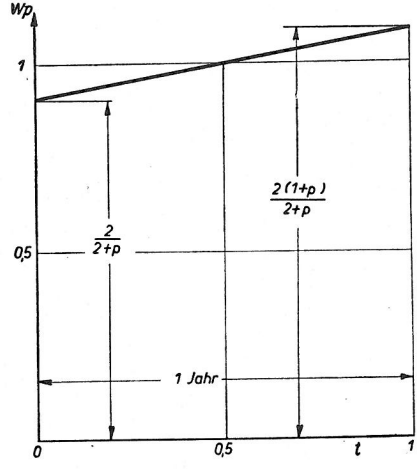
a

$$w'_{p1} = \frac{1+p}{p} \ln (1+p) \tag{35}$$

gdje je $w'_{po} = W_{mo}/\overline{W}_m$, a $w'_{p1} = W_{m1}/\overline{W}_m$.

Za slučaj aproksimacije porasta pravcem (sl. 11) jednadžba pravca glasi

$$w_p = w_{po} (1 + pt) \tag{36}$$



Sl. 11. Aproksimacija pravcem porasta potrošnje tokom godine, kad ne bi postojala sezonska varijacija potrošnje

pa uz uvjet (33) dobivamo

$$w_{po} = \frac{2}{2+p} \tag{37}$$

i

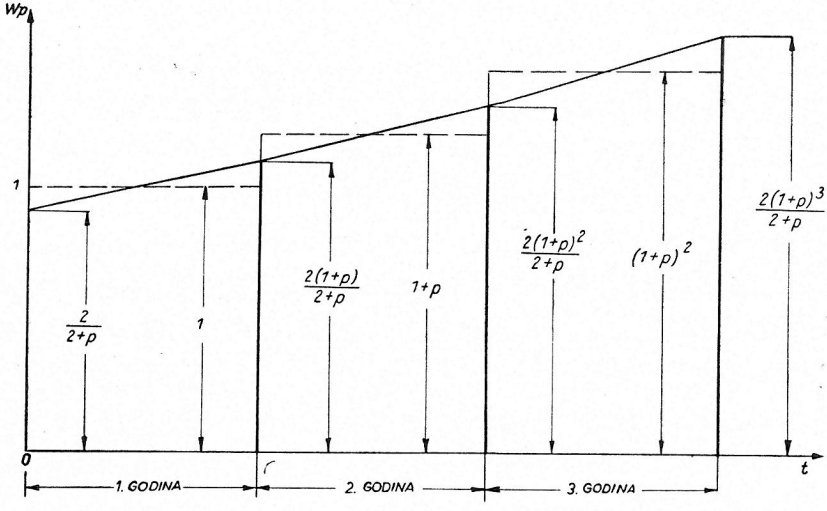
$$w_{p1} = \frac{2(1+p)}{2+p} \tag{38}$$

Relativna razlika ordinata za $t = 0$ i $t = 1$ između eksponencijalnog porasta (32) i porasta po pravcu (36) iznosi

$$\frac{\Delta W_{mo}}{W'_{mo}} = \frac{\Delta W_{m1}}{W'_{m1}} = 1 - \frac{2p}{(2+p) \ln (1+p)} \tag{39}$$

Za $p = 0{,}20$, što predstavlja vrlo veliki godišnji porast, relativna razlika iznosi 0,0027. Dakle, greška je 0,27%, što je — s obzirom na ostale pretpostavke, koje se čine kod elektroenergetskih analiza — vrlo malena pogreška, pa je porast po pravcu opravdan i prihvatljiv.

Porast (p) predstavlja porast godišnje potrošnje u promatranoj godini u odnosu na prethodnu godinu, pa je — poznavajući poraste u nizu godina — prema (37) i (38) moguće odrediti varijaciju potrošnje tokom godine za bilo koju godinu.



Sl. 12. Aproksimacija pravcem porasta potrošnje tokom godine uz eksponencijalni porast potrošnje iz godine u godinu

Često se prilike razmatraju uz pretpostavku da je godišnji porast (p) konstantan tokom godina. Ako postavimo da je u prvoj godini razmatranja prosječna mjesečna potrošnja jednaka 1 (sl. 12), potrošnju početkom i krajem godine određujemo iz relacije (37) i (38). Prosječna godišnja potrošnja u n-toj godini je $(1 + p)^{n-1}$, pa je potrošnja početkom n-te godine

$$w_{pon} = \frac{2\,(1+p)^{n-1}}{2+p} \tag{40}$$

a krajem iste godine

$$w_{p1n} = \frac{2\,(1+p)^{n}}{2+p} \tag{41}$$

Na taj način — i pored pretpostavke o porastu po pravcu unutar godine — sačuvan je eksponencijalni porast u nizu godina.

Za određivanje ukupnih godišnjih varijacija potrebno je — kako će se kasnije vidjeti — poznavati odstupanja varijacije od prosjeka ($w = 1$). Uzevši u obzir relaciju (36), ta odstupanja radi porasta iznose

$$\Delta w_p = \frac{p\,(2\,t-1)}{2+p} \tag{42}$$

b) Sezonske varijacije potrošnje

Sezonske varijacije potrošnje ovise o strukturi potrošača u elektroenergetskom sistemu i o klimatskim i životnim prilikama u kojima žive potrošači. Potrošnja većine industrijskih potrošača neovisna je o sezoni, dok potrošnja za rasvjetu, grijanje i kondicioniranje zraka u znatnoj mjeri ovisi o godišnjem dobu. Ima međutim industrijskih grana (industrija na bazi poljoprivrednih proizvoda i sl.) koje su u velikoj mjeri ovisne o sezoni.

Neke industrije (elektrolize aluminija, tvornice kalcijeva karbida i sl.) koriste međutim energiju u onom razdoblju, kad ima dovoljno energije iz hidroelektrana. Ova posljednja grupa industrije ovisi o hidrološkim prilikama — koje u nekim zemljama mogu biti u istim godišnjim razdobljima u raznim godinama vrlo različite — pa je najbolje potrošnju te grupe industrije isključiti iz razmatranja kad se radi o određivanju sezonske varijacije potrošnje. Naravno da za daljnje analize treba uzeti u obzir i spomenute potrošače i to s jednakom potrošnjom u svim mjesecima, kako bi se tek nakon detaljnijeg razmatranja odredilo kad se može osigurati opskrba tih potrošača.

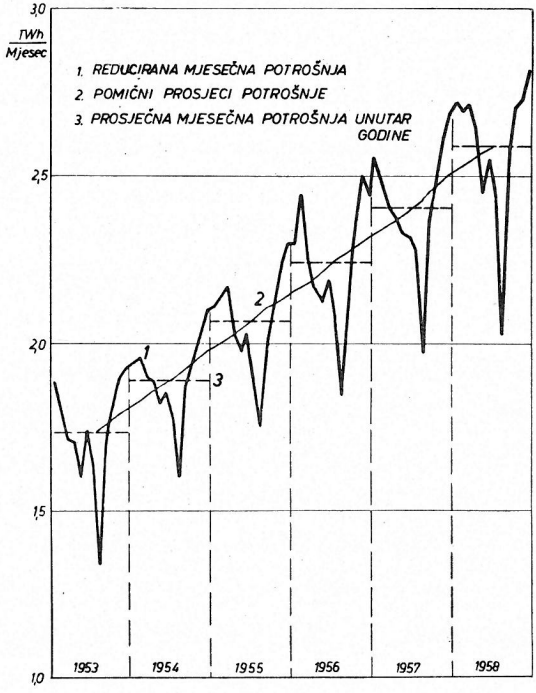
Sezonske varijacije potrošnje su različite u pojedinim elektroenergetskim sistemima, pa ih je za svaki sistem potrebno posebno odrediti na osnovu iskustva iz prošlosti.

Mogućnost određivanja sezonskih varijacija potrošnje prikazat ćemo na jednom primjeru. Neka su na sl. 13 prikazane mjesečne potrošnje u nekom elektroenergetskom sistemu u razdoblju od 1953. do 1958. godine. Mjesečne potrošnje prikazane na slici preračunate su na isti broj dana u svim mjesecima, a uz pretpostavku da broj dana u takvom mjesecu odgovara relaciji (18).

Ako bismo htjeli izvršiti još tačniju redukciju ostvarenih mjesečnih potrošnji, mogli bismo uzeti u obzir broj radnih dana (r') i broj neradnih dana (n') u pojedinom mjesecu i pojedinoj godini, te ih usporediti s prosječnim brojem radnih (r) i neradnih (n) dana u međusobno izjednačenim mjesecima. Uzevši još u obzir i omjer potrošnje u neradnom i radnom danu (w_n), koji je definiran u (19), reduciranu mjesečnu potrošnju (W_m) odredili bismo iz relacije

$$W_m = W'_m \frac{r + w_n\, n}{r' + w_n\, n'} \tag{43}$$

Poznavajući, dakle, mjesečne potrošnje određujemo pomične prosjeke, da bismo iz varijacija potrošnje eliminirali komponentu porasta. Prvi prosjek, kojeg možemo odrediti iz podataka na sl. 13, vrijedi za sredinu između VI i VII mjeseca 1953, a određuje se iz relacije



Sl. 13. Polazni podaci za primjer određivanja sezonske varijacije potrošnje

$$\overline{W}_{\text{VI-VII}} = \frac{1}{12} \sum_{\text{I. 53}}^{\text{XII. 53}} W_m \tag{44}$$

dok je drugi prosjek

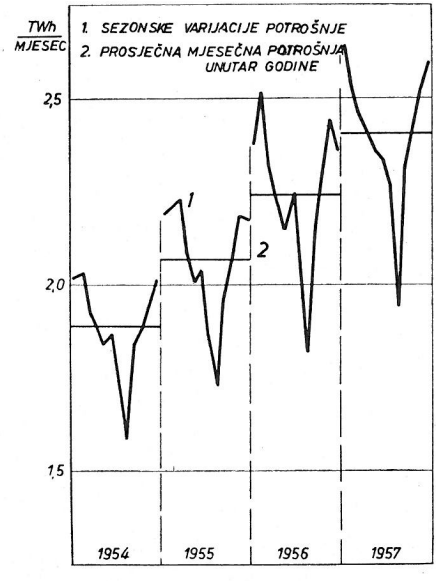
$$\overline{W}_{\text{VII-VIII}} = \frac{1}{12} \sum_{\text{II. 53}}^{\text{I. 54}} W_m \tag{45}$$

itd. Svi tako određeni prosjeci vrijede za prelaz između dva susjedna

mjeseca. Za određivanje pomičnog prosjeka za sredinu mjeseca (na primjer jula 1953), služimo se relacijom

$$\overline{W}_{\text{VII}} = \frac{1}{2} (\overline{W}_{\text{VI—VII}} + \overline{W}_{\text{VII—VIII}}) \tag{46}$$

Na analogan način određujemo pomične prosjeke za ostale mjesece u promatranom razdoblju. Naravno da za prvih šest i posljednjih šest mjeseci promatranog razdoblja (kad ne postoje podaci izvan tog razdoblja) nije moguće odrediti pomične prosjeke.



Sl. 14. Sezonska varijacija potrošnje uz pretpostavku da tokom godine nema porasta potrošnje (prema podacima na sl. 13)

Oscilacije mjesečne potrošnje oko pomičnih prosjeka prikazuju sezonske oscilacije, pa je razlika između mjesečne potrošnje (W_m) i pomičnog prosjeka ($\overline{W}_m$) u pojedinom mjesecu

$$\Delta W'_{ms} = W_m - \overline{W}_m \tag{47}$$

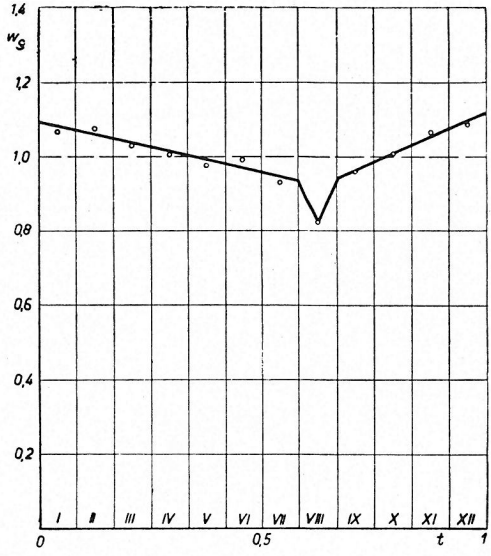
odstupanje radi sezonske varijacije potrošnje. Ako sada na prosječnu mjesečnu potrošnju u pojedinoj godini ($\overline{W}$) dodamo odstupanja ($\Delta W'_{ms}$) radi sezonske oscilacije, dobit ćemo — za naš primjer — ostvarene sezonske oscilacije (sl. 14), ali uz pretpostavku da tokom

godine nije bilo porasta potrošnje, već da se sav porast ostvario na prelazu iz jedne u drugu godinu.

Sada možemo odrediti relativne sezonske varijacije potrošnje

$$w'_s = 1 + \frac{\Delta W'_{ms}}{\overline{W}} \tag{48}$$

za pojedine mjesece u svakoj godini, pa se — kad imamo veći broj podataka nego u našem primjeru — iz tih podataka može dovoljno tačno odrediti medijan relativnih sezonskih varijacija (w_{sm}), koji karakterizira relativnu sezonsku varijaciju za svaki mjesec. Kao karakteristična veličina odabran je medijan, da bi se eliminirao utjecaj abnormalno velikih i abnormalno malih vrijednosti.



Sl. 15. Medijani relativnih sezonskih varijacija potrošnje i aproksimacija sezonskih varijacija (prema podacima na sl. 13 i 14)

Medijani relativnih vrijednosti određenih prema (48) za naš su primjer prikazani tačkama na sl. 15. Promatrajući raspored relativnih vrijednosti može se konstatirati da se za prikazani primjer sezonske varijacije u razdoblju januar - juli i u razdoblju septembar - decembar mogu aproksimirati pravcem. Relativna vrijednost u mjesecu augustu odstupa od ostalih vrijednosti radi kolektivnih dopusta koji su uobičajeni na području promatranog elektroenergetskog sistema. Aproksimacija pravcem određena je uz uvjet da kvadrat razlike ordinata

bude minimalan. Može se ocijeniti, na osnovu podataka na sl. 15, da bi se — uzimajući u obzir opisanu redukciju na isti broj radnih i neradnih dana u svakom mjesecu — podaci za pojedine mjesece još više približili pravcu koji aproksimira sezonsku varijaciju. Tako, na primjer, u mjesecima januaru, maju i decembru ima veći broj neradnih dana, nego što odgovara prosječnom mjesečnom broju neradnih dana.

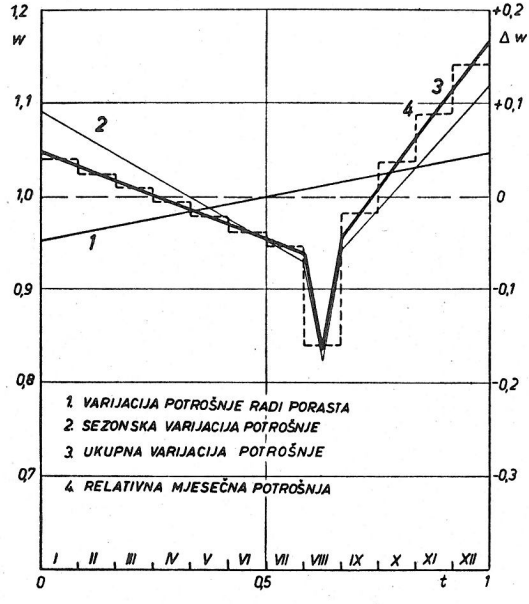
Naravno da način aproksimacije sezonskih varijacija ovisi o prilikama u pojedinom elektroenergetskom sistemu.

Dakle, aproksimacija predstavlja određenu funkcionalnu vezu koja prikazuje ovisnost relativne sezonske varijacije (w_s) o vremenu t, odnosno o mjesecu u godini. Pomoću w_s određujemo odstupanja od prosjeka ($w = 1$) pomoću relacije

$$\Delta w_s = w_s - 1 \tag{49}$$

c) Ukupne varijacije potrošnje

Poznavajući odstupanja od prosjeka varijacije radi porasta (42) i odstupanja radi sezonske varijacije (49) određuje se ukupna varijacija potrošnje iz relacije



Sl. 16. Primjer određivanja ukupne varijacije potrošnje tokom godine.

$$w = 1 + \Delta w_p + \Delta w_s, \tag{50}$$

kako je to prikazano na sl. 16.

Uz pretpostavku da su u mjesecu svi radni i neradni dani međusobno jednaki, crtkane linije na sl. 16 prikazuju mjesečne potrošnje koje služe kao osnova za određivanje potrošnje u radnom danu prema relaciji (21). Iz tog podatka — poznavajući veličine m (1), t_v (trajanje varijabilnog opterećenja) α ili β (9) i w_v (20) — određujemo sve potrebno za definiranje potreba energije i snage. Sve spomenute veličine treba odrediti za promatrani elektroenergetski sistem na temelju podataka iz prošlosti, uzevši u obzir tendenciju razvoja.

Ako potrošači, koji rade samo povremeno tokom godine, jer je njihova potrošnja ovisna o hidrološkim prilikama (lučne peći za karbid ili ferolegure, elektrolize aluminija, elektrokotlovi i sl.), predstavljaju značajnu potrošnju u odnosu na ostale potrošače, najbolje je — prilikom određivanja gore navedenih karakterističnih veličina na osnovu podataka iz prošlosti — ne uzeti u obzir njihovu potražnju. Ali, nakon što su određeni podaci o potrebama energije i snage bez spomenutih potrošača, njihovu energiju i snagu treba dodati i sa ukupnim potrebama ući u daljne analize.

d) Određivanje varijacija ostalih karakteristika potrošnje

Da bi se odredile karakteristike potrošnje, nije dovoljno poznavati samo potrebe energije. Da bi se odredila podjela na konstantnu i varijabilnu energiju i snagu, potrebno je poznavati još dvije veličine, na primjer, količinu konstantne energije i maksimalna opterećenja. To mogu biti i neke druge dvije veličine. Na primjer, omjer između varijabilne i konstantne energije i faktor opterećenja, ili omjer između konstantnog i maksimalnog opterećenja i maksimalno opterećenje itd. Za određivanje oblika aproksimirane krivulje trajanja opterećenja potrebna je još veličina t_v i α ili β (poglavlje I 1c), jer je gore navedenim veličinama već određen zbroj $\alpha + \beta$.

Za određivanje ukupnih varijacija tih veličina tokom godine može se upotrijebiti postupak koji je prikazan u prethodnim odjelcima ovog poglavlja, s razlikom da se mjesto porasta uzme u račun tendencija promjene pojedinih karakterističnih veličina.

DRUGO POGLAVLJE

OSNOVNE KARAKTERISTIKE HIDROELEKTRANA I TERMOELEKTRANA

1. Energetske karakteristike elektrana

Osnovna karakteristika elektrane je njena instalirana snaga, koja je definirana kao aritmetska suma nazivnih snaga generatora (MVA), odnosno kao aritmetski zbroj snaga turbina mjerenih na stezaljkama generatora (MW). Instalirana snaga je, dakle, nazivna snaga elektrane.

Međutim, za energetske analize potrebno je poznavati i maksimalnu snagu elektrane, kod koje uzimamo u obzir rad agregata u vezi sa svim ostalim dijelovima postrojenja, dok za određivanje instalirane snage promatramo svaki agregat posebno i bez utjecaja ostalih dijelova postrojenja. Maksimalna snaga je, dakle, ona najveća snaga koju elektrana kao cjelina može proizvesti uz pretpostavku da su svi dijelovi elektrane sposobni za pogon,. Za hidroelektranu se pored toga, pretpostavlja da su protok i pad optimalni, a za termoelektranu da stoji na raspolaganju dovoljna količina ugljena određenog kvaliteta i dovoljna količina vode normalne temperature i čistoće za hlađenje kondenzatora. Pri određivanju maksimalne snage ne postavlja se zahtjev da se postigne optimalni stupanj djelovanja, ali se uzimaju u obzir utjecaji svih dijelova postrojenja: dimenzije dovoda, tlačnog cjevovoda, odvoda i slično u hidroelektranama, kapacitet dopreme i meljave ugljena, učin kotlova, kapacitet odvoda pepela, dovoda vode i slično u termoelektranama. Razlikujemo maksimalnu snagu na priključnicama generatora (maksimalna bruto snaga) i maksimalnu snagu na pragu (maksimalna neto snaga).

Pored već definirane maksimalne snage uz optimalne uvjete, potrebno je poznavati raspoloživu snagu. To je najveća snaga koju elektrana može proizvesti u nekom momentu, polazeći od stvarnog stanja u elektrani (defekti, popravke i pregledi), a uz pretpostavku da nema ograničenja radi proizvodnje jalove snage. Pri određivanju raspoložive snage hidroelektrane treba uzeti u obzir raspoloživi dotok i pad, a u termoelektrani kvalitet ugljena, količinu i temperaturu vode. I ovdje razlikujemo raspoloživu snagu na stezaljkama generatora i na pragu elektrane.

Za hidroelektrane imamo još jednu karakterističnu veličinu koja po svojem značenju odgovara instaliranoj snazi, a to je veličina izgradnje hidroelektrane. Ona je maksimalni protok (m^3/sek) koji hidroelektrana može koristiti u normalnom pogonu, uzevši u obzir sve dijelove postrojenja.

Pored toga, hidroelektrana se karakterizira mogućom srednjom godišnjom proizvodnjom (GWh), koja je određena kao aritmetska sredina mogućih godišnjih proizvodnja u promatranom, što duljem, nizu godina. Moguća godišnja proizvodnja je maksimalna proizvodnja hidroelektrane, koja se može ostvariti korištenjem najveće moguće količine vode — uzevši u obzir ograničenje veličinom izgradnje — uz najpovoljnije uvjete. Pri određivanju raspoloživog dotoka vode treba uzeti u obzir postojanje bilo vlastite akumulacije, bilo akumulacije u uzvodnim hidroelektranama. Također treba uzeti u obzir eventualne potrebe vode za plovidbu, poljoprivredu i slično. Pri tom treba pretpostaviti, da su svi dijelovi postrojenja sposobni za pogon, da ne postoje ograničenja u mogućnosti preuzimanja energije, da ne postoje ograničenja proizvodnje radi utjecaja mreže (rezerva, proizvodnja jalove snage, regulacija frekvencije i sl.).

Nasuprot hidroelektranama, ne treba za termoelektrane posebno određivati moguću godišnju proizvodnju, jer je ta proizvodnja — uz pretpostavku da stoje na raspolaganju dovolje količine ugljena, što možemo praktički uvijek pretpostaviti — proporcionalna maksimalnoj snazi. Može se računati da je u prosjeku za revizije i održavanje potrebno oko 1000 sati/god. [10]. Pored toga, proizvodnja termoelektrane ovisi u prvom redu o mogućnosti plasmana energije, a tek u drugom redu o tehničkoj mogućnosti proizvodnje.

S obzirom na postojanje i veličinu akumulacionog bazena razlikujemo: protočne, akumulacione s dnevnom akumulacijom i akumulacione hidroelektrane sa sezonskom akumulacijom. Razlikujemo geometrijski i korisni volumen akumulacionog bazena. Geometrijski volumen je ukupni volumen vode, koji se može spremiti između tla na dnu i najviše razine vode u akumulacionom bazenu. Korisni volumen je volumen vode, koji se može spremiti između najviše i najniže razine u normalnom pogonu, a koji se i koristi u normalnom pogonu. Najniža razina vode ne mora biti jednaka najnižoj razini za slučaj pražnjenja radi pregleda i popravka. Za energetska razmatranja od naročite je važnosti korisni volumen akumulacionog bazena.

Da bi se karakterizirao korisni volumen s obzirom na hidroelektranu, uvodi se vrijeme trajanja pražnjenja akumulacionog bazena. To je minimalno vrijeme potrebno da korisni volumen isteče kroz turbine, pretpostavljajući da pri tom nema dotoka u akumulaciju. Protočnom hidroelektranom smatra se hidroelektrana čiji se akumulacioni bazen može isprazniti za manje od dva sata; za pražnjenje bazena hidroelektrane s dnevnom akumulacijom potrebno je od 2 do 400 sati, dok je za pražnjenje bazena hidroelektrane sa sezonskom akumulacijom potrebno više od 400 sati [11].

Korisni volumen se može prikazati i kao relativni volumen u odnosu na ukupni volumen vode koji tokom godine dotječe u akumulaciju.

Pored toga, akumulacioni bazen se karakterizira energetskom vrijednošću, pod kojom razumjevamo količinu električne energije koja bi se proizvela u vlastitoj hidroelektrani i u svim nizvodnim hidroelektranama za slučaj pražnjenja korisnog volumena bez dotoka vode u bazen i bez gubitaka vode.

2. Snaga i moguća proizvodnja hidroelektrana

Snagu koju proizvodi hidroelektrana na priključnicama generatora određujemo iz izraza

$$P = 9{,}81\, QH\eta \text{ kW} \tag{51}$$

gdje je Q protok kroz turbine u m^3/sek, H neto pad u m, a η stupanj djelovanja agregata (produkt stupnja djelovanja turbine i stupnja djelovanja generatora). Da bismo došli do snage na pragu treba uzeti u obzir stupanj djelovanja transformatora (η_{tr}) i omjer (s) između snage za vlastiti potrošak i snage na priključnicama

$$P = 9{,}81\, QH(1-s)\,\eta\eta_{tr} \tag{52}$$

Potrebna snaga za vlastiti potrošak u hidroelektranama kreće se od 0,25 do 2,5% od instalirane snage [12].Veliki postotak vrijedi za padove do 30 m, što ovisi o uzbudi i o načinu dobave vode za hlađenje, dok mali postotak vrijedi za velike padove.

Za hidroelektrane u stanju pretprojekta, dakle, kad još nisu tačno određene karakteristike agregata, snaga se može odrediti prema formuli

$$P = kQH \tag{53}$$

gdje je k konstanta i iznosi 7,5—8. Vrijednost $k = 8$ vrijedi za agregate snage $P \geqq 10$ MW, dok za agregate snage $P = 1$ MW vrijedi $k = 7{,}5$ [13]. Kad se radi o manjim promjenama bruto pada, može se mjesto stvarnog neto pada u (53) uvrstiti srednji energetski neto pad, kojega izračunavamo iz izraza

$$H = \frac{2}{3}H' + \frac{1}{3}H'' \tag{54}$$

gdje je H' neto pad pri maksimalnom opterećenju, a H'' neto pad pri srednjem opterećenju ili pri srednjem iskoristivom protoku [13].

Moguću proizvodnju hidroelektrane na priključnicama generatora određujemo prema izrazu

$$W = \frac{9{,}81}{3600} \int_O^T QH\eta \, dt \text{ kWh} \tag{55}$$

a energiju na pragu prema analognom izrazu, uzevši u obzir relaciju (52). Ako uzmemo u obzir relaciju (53), te ako računamo sa srednjim energetskim padom (54), dolazimo do relacije

$$W = \frac{kH}{3600} \int_O^T Q \, dt \text{ kWh} \tag{56}$$

Vrijeme t uvrštava se u sekundama, dok se energija dobiva u kWh, pa je u nazivnik potrebno postaviti 3600. Vrijednosti integrala predstavlja volumen vode (V_i), koji se može iskoristiti u vremenu T uzevši u obzir veličinu izgradnje (Q_i) hidroelektrane. Prema tome, moguća proizvodnja hidroelektrane iznosi

$$W = \frac{kHV_i}{3600} \tag{57}$$

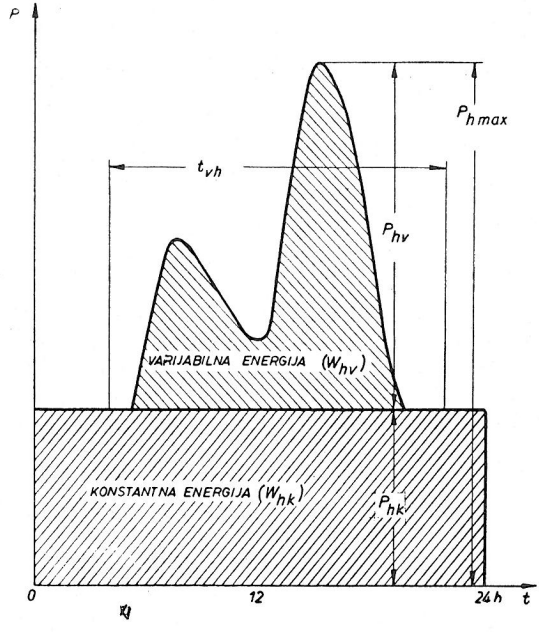
Na temelju navedenih formula određuju se moguće proizvodnje u danu, mjesecu ili godini, ali one ne daju uvid u raspored proizvodnje tokom dana, što je od velike važnosti za određivanje mogućnosti plasmana energije. Radi toga je potrebno podijeliti ukupnu moguću proizvodnju na moguću proizvodnju u razdoblju velikih opterećenja i u razdoblju malih opterećenja, odnosno na varijabilnu i konstantnu energiju hidroelektrane. Podjela proizvodnje na energiju u razdobljima velikih i malih opterećenja, kao i podjela na varijabilnu i konstantnu energiju analogna je podjeli dnevnog dijagrama opterećenja, kako je to prikazano u poglavlju I.1b.

3. Podjela moguće proizvodnje na varijabilnu i konstantnu energiju hidroelektrana

Najprije ćemo odrediti varijabilnu i konstantnu energiju hidroelektrane, jer je — kako će se kasnije vidjeti — ta podjela interesantnija i jer je prelaz na energiju u razdoblju velikih i malih opterećenja jednostavan.

Pod varijabilnom energijom razumijevamo onu količinu energije, koju hidroelektrana — a da ne dođe do preljeva vode — može s bilo

kojom snagom (između konstantne i maksimalne snage) proizvesti u razdoblju velikih opterećenja. Konstantna energija je ona količina energije koju hidroelektrana mora proizvesti s konstantnom snagom



Sl. 17. Podjela na varijabilnu i konstantnu energije hidroelektrana.

da bi se spriječili preljevi vode. Na slici 17 prikazana je podjela na varijabilnu i konstantnu energiju za dijagram opterećenja neke hidroelektrane u jednom danu.

a) Maksimalno potrebna energetska vrijednost akumulacije

Odredimo najprije potrebnu energetsku vrijednost akumulacije uz uvjet da se želi postići najveća moguća varijabilna energija u najkraćem mogućem vremenu i uz najveću moguću snagu, ali tako da ne dođe do preljeva. Neka je u promatranom razdoblju ($P_{h\,max}$) maksimalna snaga hidroelektrana, a (P_h) snaga koju bi hidroelektrana proizvela kad bi se voda koristila onako kako dotječe.

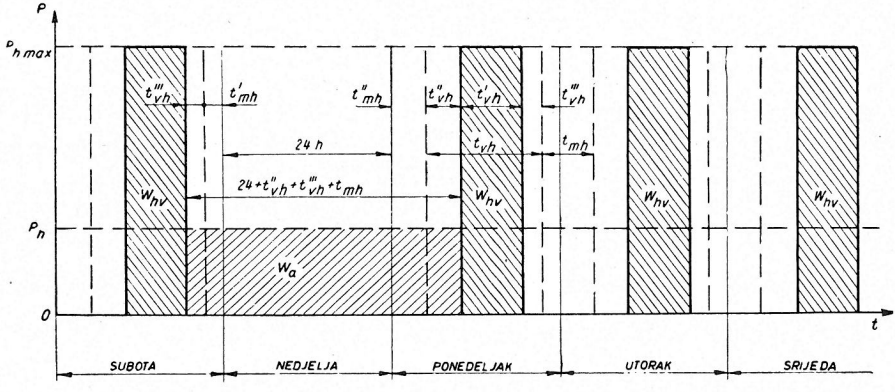
Pođimo od malih protoka, odnosno od male snage P_h (sl. 18). Tada je moguće — radi postojanja akumulacije i s obzirom na malu snagu P_h — cjelokupnu količinu vode koja dotječe hidroelektrani, iskoristiti za proizvodnju energije u razdoblju velikih opterećenja. U razdoblju od (r) radnih i (n) neradnih dana ukupna proizvodnja iznosi

$$W_{hm} = 24\,(r + n)\,P_h \tag{58}$$

a budući da se sva proizvodnja ostvaruje u radnim danima, uz korištenje maksimalne snage kroz t'_{vh} sati/dan (sl. 18), ukupna je proizvodnja

$$W_{hm} = rt'_{vh}\,P_{h\,\max} \tag{59}$$

U neradnom danu, kako je pretpostavljeno prilikom određivanja mjesečne krivulje trajanja opterećenja u poglavlju I 2b, nije potrebna varijabilna energija, a istodobno je potrebna i manja količina energije u usporedbi s potrebama radnog dana. Ta pretpostavka vrijedi tim više što je u radnom danu, koji prethodi neradnom danu, obično manja potrošnja električne energije, pa se može računati da će se potrebe varijabilne energije u neradnom danu moći pokriti smanjenjem potreba



Sl. 18. Potrebna energetska vrijednost akumulacije (W_a) za slučaj malih protoka odnosno male srednje snage (P_h).

u radnom danu koji mu prethodi. Radi toga se u neradnom danu puni akumulacioni bazen, da bi se povećala proizvodnja u radnim danima. Budući da je proizvodnja koncentrirana u razdoblju velikih opterećenja (t'_{vh}), puni se akumulacioni bazen i kroz vremena t''_{vh}, t'''_{vh} i t_{mh} (sl. 18). Da bi se mogla akumulirati sva voda koja dotječe tokom neradnog dana i tokom vremena $t'''_{vh} + t'_{mh}$ u danu koji prethodi neradnom danu i tokom vremena $t''_{mh} + t''_{vh}$ u danu nakon neradnog dana, potrebna je energetska vrijednost akumulacije

$$W_a = (24 + t_{mh} + t''_{vh} + t'''_{vh})\,P_h \tag{60}$$

Uzevši u obzir da je — prema sl. 18 —

$$t_{mh} + t''_{vh} + t'''_{vh} = 24 - t'_{vh} \tag{61}$$

te da za (P_h) i (t'_{vh}) možemo uvrstiti vrijednosti iz (58) i (59), dolazimo do izraza za potrebnu energetsku vrijednost akumulacije

$$W_a = \frac{W_{hm}}{24\,(r+n)}\left(2 \cdot 24 - \frac{W_{hm}}{rP_{h\,\max}}\right) \tag{62}$$

u kojemu je — za promatrani energetski sistem — potrebna energetska vrijednost akumulacije funkcija ukupne moguće proizvodnje hidroelektrane.

Da bismo uveli relativne vrijednosti, definirajmo relativnu proizvodnju u promatranom razdoblju

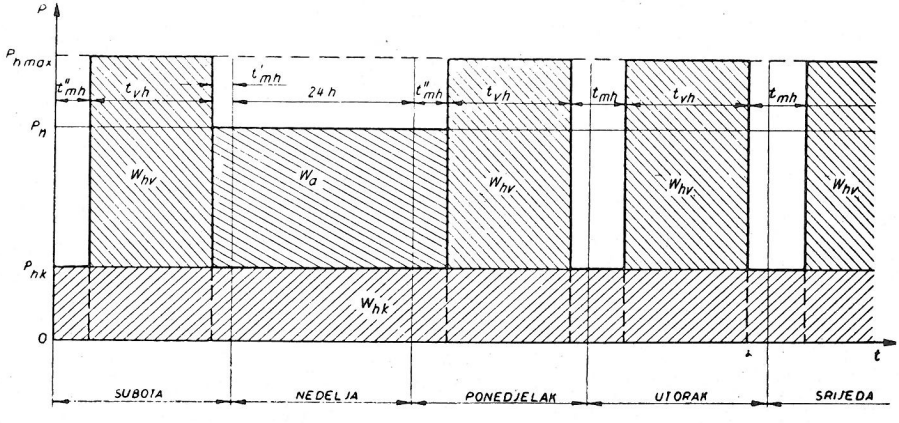
$$w_m = \frac{W_{hm}}{24\,(r+n)\,P_{h\,\max}} \tag{63}$$

i relativnu vrijednost akumulacije

$$a = \frac{W_a}{24\,P_{h\,\max}} \tag{64}$$

Sada (62) možemo pisati u obliku

$$a = w_m\left(2 - \frac{r+n}{r}\,w_m\right) \tag{65}$$



Sl. 19. Potrebna energetska vrijednost akumulacije (W_a) za slučaj većih protoka odnosno veće srednje snage (P_h).

Promotrimo sada slučaj, kad je P_h veliko, odnosno kad je moguća proizvodnja tolika da nije moguće svu vodu iskoristiti u razdoblju velikih opterećenja (sl. 19), pa se radi toga, a da ne dođe do preljeva, voda koristi za proizvodnju konstantne energije. Ukupna proizvodnja u promatranom razdoblju može se sada prikazati izrazom

$$W_{hm} = 24\,(r+n)\,P_{hk} + rt_{vh}\,(P_{h\max} - P_{hk}) \tag{66}$$

gdje je P_{hk} konstantna snaga kojom radi hidroelektrana i u neradnom danu i u razdoblju malih opterećenja u radnim danima. Da bi se mogla akumulirati sva voda, koja dotječe tokom neradnog dana i za vrijeme t'_{mh} dana koji prethodi neradnom danu, kao i za vrijeme t''_{mh} radnog dana nakon neradnog dana, potrebna energetska vrijednost akumulacije iznosi

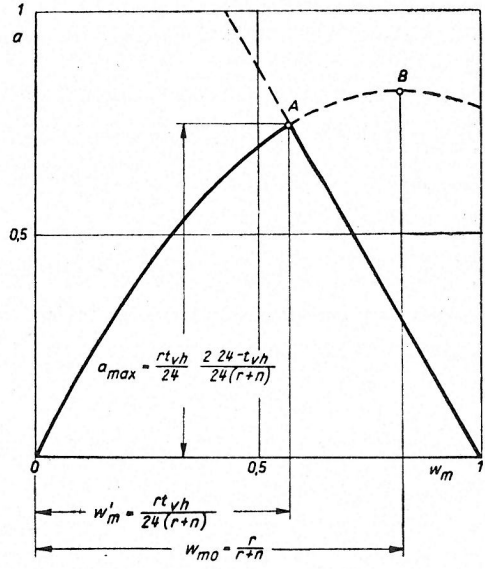
$$W_a = (24 + t_{mh})(P_h - P_{hk}) \tag{67}$$

Uvrštavanjem za $t_{mh} = 24 - t_{vh}$ a za P_h i P_{hk} vrijednosti iz (58) i (66) dobivamo, da je

$$W_a = \frac{rt_{vh}(2 \cdot 24 - t_{vh})}{24(r+n) - rt_{vh}} \left[P_{h\max} - \frac{W_{hm}}{24(r+n)} \right] \tag{68}$$

Uvođenjem relativnih vrijednosti iz (63) i (64) imamo

$$a = \frac{rt_{vh}}{24} \frac{2 \cdot 24 - t_{vh}}{24(r+n) - rt_{vh}} (1 - w_m) \tag{69}$$



Sl. 20. Ovisnost relativne energetske vrijednosti akumulacije (a) o relativnoj mogućoj proizvodnji (w_m).

I sada je potrebna energetska vrijednost akumulacije za promatranu hidroelektranu u promatranom elektroenergetskom sistemu funkcija ukupne moguće proizvodnje.

Parabola (65) i pravac (69) sijeku se u točki A na sl. 20, pa to sjecište daje najveću relativnu energetsku vrijednost akumulacije,

koja je potrebna da se ostvari najveća moguća proizvodnja u razdoblju velikih opterećenja, odnosno najveća moguća proizvodnja varijabilne energije. Najveća relativna energetska vrijednost akumulacije ($a_{\max}$) potrebna je kad hidroelektrana ima relativnu moguću proizvodnju

$$w'_m = \frac{r t_{vh}}{24\,(r+n)} \tag{70}$$

jer je to vrijednost apscise sjecišta parabole i pravca. Uvrštavanjem (70) u (65) ili u (69) dobivamo

$$a_{\max} = \frac{r t_{vh}}{24} \, \frac{2 \cdot 24 - t_{vh}}{24\,(r+n)} \tag{71}$$

Ordinata sjecišta parabole i pravca predstavlja maksimalnu potrebnu energetsku vrijednost akumulacije, jer se tjeme B (sl. 20) parabole uvijek nalazi desno od sjecišta A. Točka B na paraboli (65) ima apscisu $\frac{r}{r+n}$ a ona je uvijek veća od w'_m (70) jer je uvijek $t_{vh} < 24$ sata.

Ovdje treba naglasiti da veličinu t_{vh} ne treba zamijeniti s veličinom t_v, o kojoj je bilo govora u poglavlju I 1c. Veličina t_v, naime, predstavlja vrijeme trajanja varijabilnog opterećenja, dok vrijeme t_{vh} treba da bude kraće radi osiguranja plasmana energije iz hidroelektrane. O tomu će biti još govora u poglavlju IV.

Izraz (71) vrijedi — prema izvodu — za slučaj kad nakon r radnih dana dolazi jedan neradni dan i to za bilo koji r.

Ako bismo, na primjer, imali slučaj da nakon r' radnih dana dolaze dva neradna dana, na analogan način bismo došli do slijedećeg izraza za maksimalno potrebnu energetsku vrijednost akumulacije

$$a_{\max} = \frac{r' t_{vh}}{24} \cdot \frac{3 \cdot 24 - t_{vh}}{24\,(r'+n')} \tag{72}$$

Kad smo ustanovili $a_{\max}$, možemo pristupiti određivanju moguće proizvodnje varijabilne i konstantne energije.

b) Moguća proizvodnja varijabilne i konstantne energije

Prilikom određivanja količina varijabilne i konstantne energije treba razlikovati dva slučaja:

prvi, kad je korisna energetska vrijednost akumulacije a_k veća od maksimalno potrebne $a_{\max}$ određene relacijom (71), odnosno kad je ispunjena nejednadžba

$$a_k \geqq a_{\max} \tag{73}$$

i drugi, kad je ispunjena nejednadžba

$$a_k < a_{\max} \tag{74}$$

Promotrimo najprije slučaj određen nejednadžbom (73). Za male dotoke, tj. za male P_h, imamo situaciju prikazanu na sl. 18. Tada je moguća proizvodnja varijabilne energije u promatranom razdoblju jednaka ukupnoj mogućoj proizvodnji. Dakle, cjelokupna proizvodnja može se ostvariti u razdoblju velikih opterećenja. Ako relativnu proizvodnju varijabilne energije w_v definiramo analogno izrazu (63), vrijedi relacija

$$w_v = w_m \tag{75}$$

Gornji izraz vrijedi u granicama

$$0 \leqq W_{hm} \leqq rt_{vh} P_{h\max} \tag{76}$$

odnosno prikazano u relativnim veličinama

$$0 \leqq w_m \leqq \frac{rt_{vh}}{24\,(r+n)} \tag{77}$$

Za veće dotoke odnosno za veću proizvodnju prilike su prikazane na sl. 19. Tada je moguća proizvodnja varijabilne energije

$$W_{hv} = rt_{vh}\,(P_{h\max} - P_{hk}) \tag{78}$$

odakle, nakon uvrštenja za P_{hk} vrijednosti iz (66), dobivamo

$$W_{hv} = \frac{rt_{vh}}{24\,(r+n) - rt_{vh}}\,[24\,P_{h\max}\,(r+n) - W_{hm}] \tag{79}$$

Uvođenjem relativnih veličina dobivamo

$$w_v = \frac{rt_{vh}}{24\,(r+n)\,rt_{vh}}\,(1 - w_m) \tag{80}$$

Izraz (80) vrijedi za

$$\frac{rt_{vh}}{24\,(r+n)} \leqq w_m \leqq 1 \tag{81}$$

Prema tome, postoji relativna ukupna proizvodnja

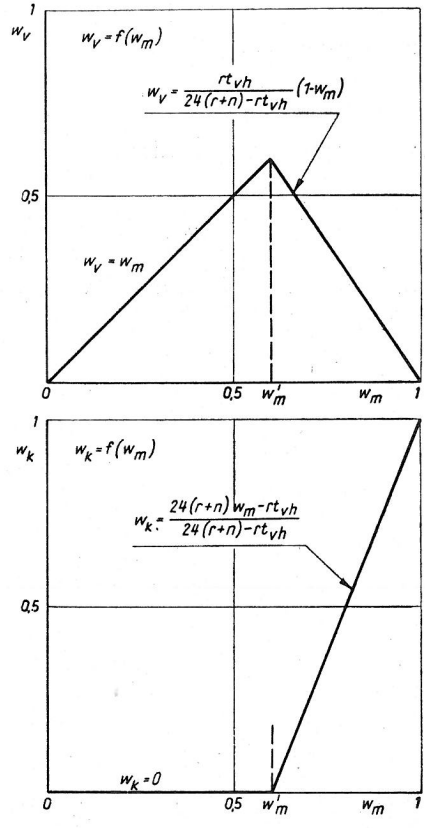
$$w'_m = \frac{rt_{vh}}{24\,(r+n)} \tag{82}$$

o kojoj ovisi način određivanja količine varijabilne energije. Ako je, naime, relativna ukupna proizvodnja $w_m \leqq w'_m$, relativna količina varijabilne energije određuje se prema (75), a ako je $w_m \geqq w'_m$, upotrebljava se izraz (80).

Praktičnije je, međutim, najprije odrediti količinu konstantne energije, pa iz uvjeta da je zbroj konstantne i varijabilne jednak ukupnoj energiji, odrediti varijabilnu energiju. Prema tome, kad je $w_m \leqq w'_m$, relativna količina konstantne energije je $w_k = 0$, a kad je $w_m \geqq w'_m$

$$w_k = \frac{24\,(r+n)\,w_m - rt_{vh}}{24\,(r+n) - rt_{vh}} \tag{83}$$

Na sl. 21 prikazane su ovisnosti $w_v = f\,(w_m)$ i $w_k = f\,(w_m)$. Najveća količina varijabilne energije može se proizvesti kad ukupna proizvodnja postigne vrijednost w'_m (82).



Sl. 21. Ovisnost relativne proizvodnje varijabilne energije (w_v) i relativne proizvodnje konstantne energije (w_k) o relativnoj mogućoj proizvodnji (w_m) za $a_k \geqq a_{max}$.

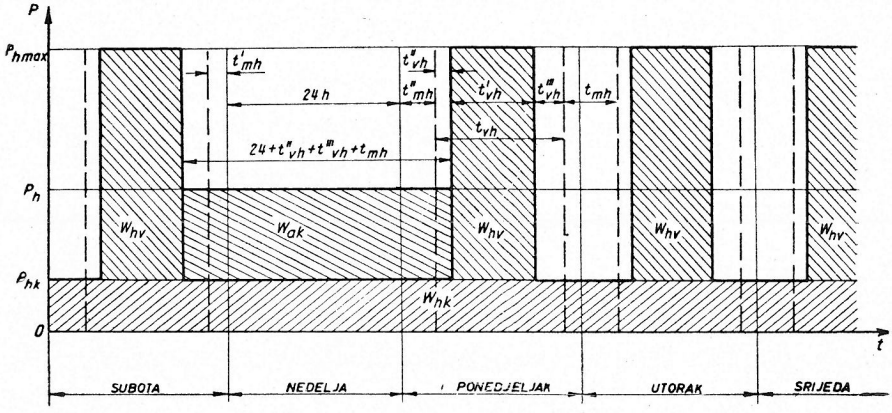
Sada promotrimo slučaj kad je ispunjena nejednadžba (74).

Za vrlo male snage P_h, odnosno za vrlo male ukupne proizvodnje imamo i sada prilike kao na sl. 18, pa za određivanje varijabilne energije vrijedi relacija (75). Granica do koje vrijedi (75) može se odrediti iz

(65), koja vrijedi za prilike na sl. 18. Sada, međutim, mjesto a treba postaviti korisnu energetsku vrijednost akumulacije a_k. Granica do koje vrijedi (75) je dakle

$$w''_m = \frac{r}{r+n}\left(1 - \sqrt{1 - \frac{r+n}{r} a_k}\right) \tag{84}$$

koja za $a_k = a_{\max}$ (71) prelazi u (82). Pozitivni predznak pred korjenom nema značenja, jer bi tada w''_m praktički bio uvijek veći od 1, što po



Sl. 22. Proizvodnja varijabilne i konstantne za slučaj kad je $a_k < a_{\max}$ i kad je $w''_m \leqq w_m \leqq w'''_m$.

definiciji za relativnu moguću proizvodnju nema značenja. Prema tome, za

$$0 \leqq w_m \leqq w''_m \tag{85}$$

vrijedi relacija (75).

Za relativnu ukupnu proizvodnju veću od w''_m (84) imamo prilike prikazane na sl. 22. Proizvodnja varijabilne energije sada iznosi

$$W_{hv} = rt'_{vh}\,(P_{h\max} - P_{hk}) \tag{86}$$

dok između korisne energetske vrijednosti akumulacije i konstantne snage postoji relacija

$$W_{ak} = (2 \cdot 24 - t'_{vh})\,(P_h - P_{hk}) \tag{87}$$

pa za varijabilnu energiju vrijedi izraz

$$W_{hv} = rt'_{vh}\left[P_{h\max} - \frac{W_{hm}}{24\,(r+n)} + \frac{W_{ak}}{2 \cdot 24 - t'_{vh}}\right] \tag{88}$$

Ako se uzmu u obzir relativne vrijednosti (63) i (64), izraz (88) glasi

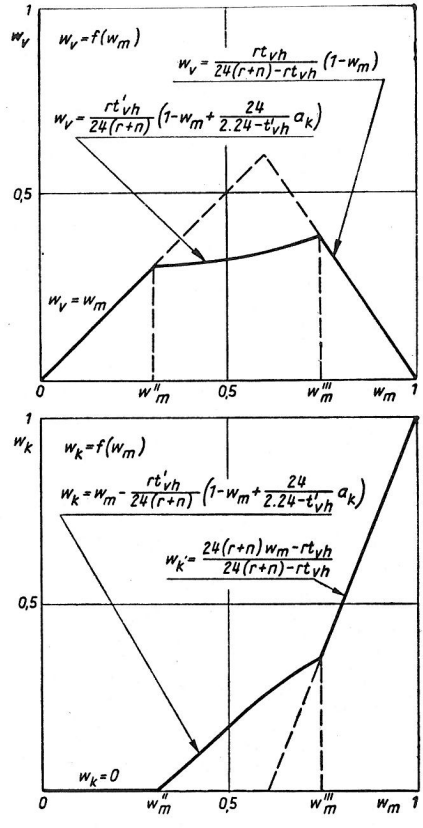
$$w_v = \frac{rt'_{vh}}{24(r+n)}\left(1 - w_m + \frac{24}{2\cdot 24 - t'_{vh}} a_k\right) \tag{89}$$

U njemu je t'_{vh} još neodređena veličina koja ovisi o w_m i a_k. Da bismo odredili t'_{vh}, postavimo izraz za ukupnu proizvodnju

$$W_{hm} = 24(r+n)P_{hk} + rt'_{vh}(P_{h\max} - P_{hk}) \tag{90}$$

pa iz (87) i (90) dobivamo — uzevši u obzir relativne vrijednosti — da je

$$t'_{vh} = 12\left[\left(2 + \frac{a_k}{1-w_m}\right) - \sqrt{\left(2 + \frac{a_k}{1-w_m}\right)^2 - 4\frac{r+n}{r}\frac{a_k}{1-w_m}}\right] \tag{91}$$



Sl. 23. Ovisnost relativne proizvodnje varijabilne energije (w_v) i relativne proizvodnje konstantne energije (w_k) o relativnoj mogućoj proizvodnji (w_m) za $a_k < a_{\max}$.

Relativna količina varijabilne energije određuje se prema (89) sve dok ne postane $t'_{vh} = t_{vh}$. Izjednačenjem jednadžba (80) i (89),

te postavljanjem $t'_{vh} = t_{vh}$ određujemo gornju granicu w'''_m za koju još vrijedi relacija (89)

$$w'''_m = 1 - \frac{24}{rt_{vh}} \frac{24(r+n) - rt_{vh}}{2 \cdot 24 - t_{vh}} a_k \tag{92}$$

Dakle, (89) vrijedi u slijedećim granicama

$$w''_m \leqq w_m \leqq w'''_m \tag{93}$$

Konačno za

$$w'''_m \leqq w_m \leqq 1 \tag{94}$$

dolazimo do prilika kao na sl. 19, kad se količina varijabilne energije određuje prema (80).

Sada se može umjesto $w_v = f(w_m)$ prijeći na $w_k = f(w_m)$. Tada imamo unutar granica (85) $w_k = 0$, unutar granica (93)

$$w_k = w_m - \frac{rt'_{vh}}{24(r+n)} \left(1 - w_m + \frac{24}{2 \cdot 24 - t'_{vh}} a_k\right) \tag{95}$$

dok unutar granica (94) vrijedi relacija (83).

Na sl. 23 prikazane su ovisnosti $w_v = f(w_m)$ i $w_k = f(w_m)$.

Provedena razmatranja vrijede uz pretpostavku da nakon r radnih dana dolazi jedan neradni dan, a ista razmatranja možemo provesti i uz pretpostavku da nakon r radnih dana dolaze dva neradna dana. I u ovom slučaju za $a_k \geqq a_{\max}$ prema (72) vrijede jednadžbe (75) i (80) u granicama određenim relacijama (77) i (81). Za slučaj $a_k < a_{\max}$ vrijede relacije

$$w_v = \frac{rt'_{vh}}{24(r+n)} \left(1 - w_m + \frac{24}{3 \cdot 24 - t'_{vh}} a_k\right) \tag{96 a}$$

$$t'_{vh} = 12 \left[3 + \frac{a_k}{1 - w_m} - \sqrt{\left(3 + \frac{a_k}{1 - w_m}\right)^2 - 4 \frac{r+n}{r} \frac{a_k}{1 - w_m}}\right] \tag{96 b}$$

$$w''_m = \frac{r}{r+n} \left(\frac{3}{2} - \sqrt{\frac{9}{4} - \frac{r+n}{r} a_k}\right) \tag{97 a}$$

$$w'''_m = 1 - \frac{24}{rt_{vh}} \frac{24(r+n) - rt_{vh}}{3 \cdot 24 - t_{vh}} \tag{97 b}$$

c) Dnevne i mjesečne količine varijabilne i konstantne energije

Na temelju razmatranja u prethodnom odjeljku možemo odrediti dnevnu količinu varijabilne i konstantne energije posebno za radni, a posebno za neradni dan.

Koristeći relacije pomoću kojih se određuje relativna količina varijabilne energije (w_v), količinu varijabilne energije u jednom radnom danu (W_{hvd}) određujemo iz relacije

$$W_{hvd} = \frac{24\,(r+n)}{r}\, P_{h\max} w_v \tag{98}$$

dok u neradnom danu prema definiciji nema varijabilne energije.

Pomoću izraza za relativnu količinu konstantne energije (w_k) također možemo odrediti količinu konstantne energije (W_{hkd}) u jednom danu (bez obzira da li se radi o radnom ili neradnom danu, jer ni u jednom slučaju nema razlike u konstantnoj energiji)

$$W_{hkd} = 24\, P_{h\max}\, w_k \tag{99}$$

Pored dnevnih količina, vrlo često nas interesiraju mjesečne količine konstantne i varijabilne energije. Prilikom određivanja količina varijabilne i konstantne energije, račun je proveden uz pretpostavku da, na primjer, nakon neradnog dana dolazi 6 radnih dana, iza čega ponovno neradni dan, pa 6 radnih dana itd. Prema tome je omjer $r/(r+n) = 6/7 = 0{,}857$. Taj odnos, međutim, kad promatramo mjesec neće biti ispunjen, a osim toga neće se ni jednoliko izmjenjivati neradni s radnim danima. Kad bismo, naime, htjeli tačno računati, trebalo bi uzeti u obzir sve moguće kombinacije izmjene neradnih i radnih dana, pa sve stvarne situacije koje nastupaju u pojedinim mjesecima, vodeći računa o pomičnim neradnim danima (postoje, naime, neradni dani koji su fiksirani datumom, ali padaju u različite dane u sedmici, kao i neradni dani koji su fiksirani danom u sedmici, ali padaju na različite datume). Sve bi to izazvalo vrlo velike komplikacije, a ne bi — u razmjeru s tim — dovelo do znatnije tačnosti. Radi toga — kako je već pokazano u poglavlju I 2b — pretpostavljamo da u svim mjesecima imamo isti broj radnih i neradnih dana, koji odgovara prosječnom mjesečnom broju radnih i neradnih dana, pa u formule za određivanje varijabilne i konstantne energije uvrštavamo taj prosječni broj radnih i neradnih dana. Tako, na primjer, ako pretpostavimo da je prosječno $r = 25$ dana, dobivamo omjer $r/(r+n) = 0{,}822$, dakle nastaje pogreška koja se razlikuje od omjera u tjednu s jednim neradnim danom za 4,2%. Utjecaj te pogreške je još manji ako uzmemo u obzir da smo, na temelju iste pretpostavke o broju radnih i neradnih dana u mjesecu, odredili mjesečne potrebe varijabilne i konstantne energije (poglavlje I 2b).

Iz relativnih količina varijabilne i konstantne energije (w_v i w_k) određujemo mjesečne količine varijabilne i konstantne energije koristeći relacije analogne izrazu (63).

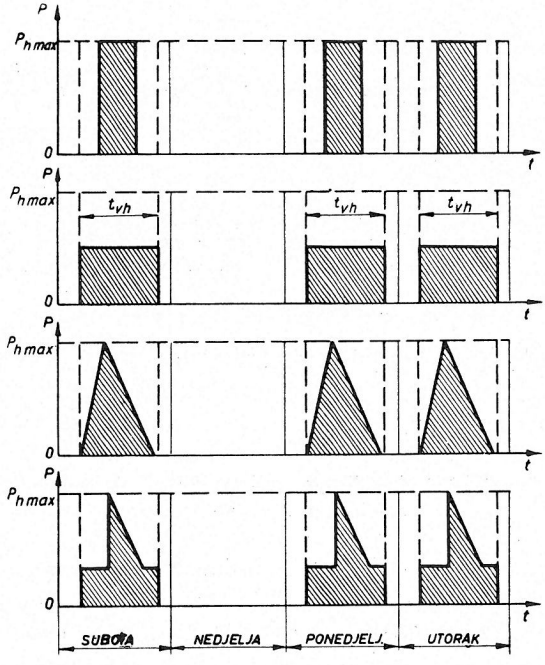
d) Korištenje varijabilne energije

Količina varijabilne energije određena je uz pretpostavke, da se želi postići najveća moguća količina u najkraćem mogućem vremenu, i naravno, uz najveću moguću snagu, dakle, uz najteže pretpostavke, s obzirom na korištenje akumulacionog bazena. Prilikom razmatranja u poglavlju II 3b baš radi postavljenih pretpostavki računato je da su dijagrami opterećenja pravokutnici. Međutim, u svim slučajevima kad je — za $a \geqq a_{\max}$ — ispunjena nejednadžba

$$w_m < \frac{r t_{vh}}{24\,(r+n)}, \tag{100}$$

a za $a_k < a_{\max}$, kad je ispunjena nejednadžba

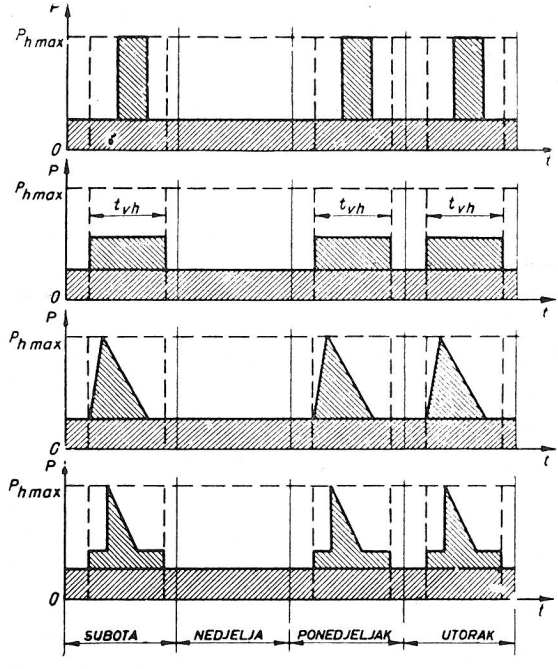
$$w_m < 1 - \frac{24}{r t_v} \frac{24\,(r+n) - r t_{vh}}{2 \cdot 24 - t_{vh}} a_k \tag{101}$$



Sl. 24. Neke mogućnosti korištenja varijabilne energije, kad je $w_k = 0$

proizvodnja varijabilne energije se može ostvariti s bilo kakvim dijagramom opterećenja uz uvjet da maksimalno opterećenje ne bude veće od maksimalne snage hidroelektrane. Neke mogućnosti prikazane su na sl. 24 i 25.

U slučajevima kad nisu zadovoljene nejednadžbe (100) i (101) nije moguće odstupanje od pravokutnog dijagrama opterećenja (sl. 19) bez gubitaka vode, pa je to i razlog radi čega treba odabrati t_{vh} tako da bude $t_{vh} < t_v$.



Sl. 25. Neke mogućnosti korištenja varijabilne energije, kad je $w_k \neq 0$ i $a_k < a_{max}$.

e) Određivanje moguće proizvodnje u razdoblju velikih i malih opterećenja

Ako je poznata količina varijabilne i konstantne energije može se — kako je već spomenuto — jednostavno odrediti moguću proizvodnju u razdoblju velikih i malih opterećenja. Sva varijabilna energija spada u razdoblje velikih opterećenja, dok od konstantne energije u razdoblje velikih opterećenja otpada dio proporcionalan trajanju velikih opterećenja. Tako je moguća proizvodnja u razdoblju velikih opterećenja

$$w_g = w_v + w_k \frac{r t_v}{24\,(r+n)} \tag{102}$$

a proizvodnja u razdoblju malih opterećenja

$$w_{kl} = w_k \left[1 - \frac{rt_v}{24\,(r+n)} \right] \tag{103}$$

4. Utjecaj uzvodnih akumulacija na proizvodnju varijabilne i konstantne energije

Razmatranja u prethodnom odjeljku vrijede samo za slučaj kad je dotok u akumulaciju konstantan, a to će biti uvijek ispunjeno ako se uzvodno od promatrane hidroelektrane ne nalazi akumulaciona hidroelektrana. Uzvodna akumulaciona hidroelektrana koristi vodu koja dotječe u njezin akumulacioni bazen na način kako je već opisano u prethodnom poglavlju, pa takav način korišćenja vode ima utjecaja i na nizvodnu hidroelektranu. Da bismo odredili taj utjecaj, moramo uzeti u obzir omjer količine vode V_1 koja dotječe u akumulaciju uzvodne hidroelektrane i količine vode V_2 koja dotječe u akumulaciju nizvodne hidroelektrane. U količinu vode V_2 uključen je dotok u akumulaciju uzvodne hidroelektrane i dotok između odvoda iz uzvodne hidroelektrane i ulaznog uređaja nizvodne hidroelektrane. Taj omjer je

$$v = \frac{V_1}{V_2} = \frac{Q_1}{Q_2} \tag{104}$$

gdje su Q_1 i Q_2 dotoci (m^3/sek) u akumulacione bazene. Pored toga — kako će se vidjeti — na mogućnost proizvodnje varijabilne energije u nizvodnoj akumulaciji utječe i omjer veličina izgradnje dviju hidroelektrana, koji je definiran relacijom

$$q = \frac{Q_{i1}}{Q_{i2}} \tag{105}$$

Korisno je, osim toga, da se snaga i energija, kao i relativna proizvodnja te relativna vrijednost akumulacije uzvodne hidroelektrane reduciraju na pad i maksimalnu snagu nizvodne hidroelektrane. Snagu i energiju reduciramo množenjem s omjerom padova H_2/H_1. Ako relativnu proizvodnju uzvodne hidroelektrane prikažemo relacijom koja je analogna relaciji (63)

$$w_{1m} = \frac{W_{h1m}}{24\,(r+n)\,P_{h1\max}} \tag{106}$$

pa preračunamo W_{h1m} na pad nizvodne hidroelektrane, te dijelimo tu novu proizvodnju W'_{h1m} s maksimalnom snagom nizvodne hidroelektrane, dobit ćemo relaciju

$$w_{1m} = \frac{H_1}{H_2} \frac{P_{h2\max}}{P_{h1\max}} \frac{W'_{h1m}}{24\,(r+n)\,P_{h2\max}} \tag{107}$$

Uzevši sada u obzir relaciju (53) i (105), te vodeći računa da za omjer energije W'_{h1m} i energije u nizvodnoj hidroelektrani vrijedi omjer definiran relacijom (104), a uz pretpostavku da su pad H i stupanj djelovanja η konstantni, dobivamo da je

$$w_{1m} = \frac{v}{q} w_{2m} \tag{108}$$

Na analogan način, a polazeći od relacije (64), dobivamo da je relativnu vrijednost gornje akumulacije a'_1, reduciranu na nizvodnu hidroelektranu, moguće prikazati izrazom

$$a'_1 = qa_1 \tag{109}$$

gdje je a_1 relativna nereducirana vrijednost uzvodne akumulacije određena prema relaciji (68).

a) Potrebna energetska vrijednost nizvodne akumulacije

Pođimo od određivanja potrebne energetske vrijednosti nizvodne akumulacije uz zahtjev da se postigne maksimalno moguća proizvodnja varijabilne energije.

Način određivanja energetske vrijednosti akumulacionog bazena uzvodne hidroelektrane ovisi o veličini omjera q (105) u odnosu na veličinu omjera v (104).

Pretpostavimo najprije da je relativna reducirana energetska vrijednost uzvodne akumulacije

$$a'_{kl} \geqq a'_{1\max} = q \frac{rt_{vh}}{24} \frac{2 \cdot 24 - t_{vh}}{24(r+n)} \tag{110}$$

Izraz (110) dobiven je prema (71), koristeći relaciju (109).

Da bismo prikazali utjecaj veličina q i v na način određivanja potrebne vrijednosti akumulacije, pođimo od malih vrijednosti za q. Promatrajući prilike u uzvodnoj i nizvodnoj hidroelektrani u ovisnosti o relativnoj proizvodnji

$$w_{2m} = \frac{W_{h2m}}{24(r+n) P_{h2\max}} \tag{111}$$

nizvodne hidroelektrane, moći ćemo nacrtati (sl. 26) ovisnost potrebne

Tab. 1. Formule za određivanje potrebne relativne energetske vrijednosti akumulacija za uzvodnu i nizvodnu hidroelektranu za slučaj 1 (uz sl. 26).

Slučaj 1

$0 \leqq q \leqq \frac{rt_{vh}}{24(r+n)} v$

$\boxed{a'_1 = f(w_{2m})}$

$$a = \frac{q}{v}\,\frac{r\,t_{vh}}{24\,(r+n)}\;;\; b = \frac{q}{v}$$

$$O - A_1 : a'_1 = v\,w_{2m}\left(2 - \frac{r+n}{r}\,\frac{v}{q}\,w_{2m}\right)$$

$$A_1 - B_1 : a'_1 = q\,\frac{r\,t_{vh}}{24}\,\frac{2\cdot 24 - t_{vh}}{24\,(r+n) - r\,t_{vh}}\left(1 - \frac{v}{q}\,w_{2m}\right)$$

$$a'_{1\max} = q\,\frac{r\,t_{vh}}{24}\,\frac{2\cdot 24 - t_{vh}}{24\,(r+n)}$$

$\boxed{a_2 = f(w_{2m})}$

A. $a'_{k1} \geqq a'_{1\max}$

$$c = \frac{r\,t_{vh}}{24\,(r+n)}\;;\; d = 1$$

Situacija I: $O - A$: $a_2 = w_{2m}\,(1 - v)\left(2 - \frac{r+n}{r}\,w_{2m}\right) + \frac{r+n}{r}\,(v - q)\,w_{2m}$

Situacija II; $A - B$: $a_2 = w_{2m}\,(1 - v)\left(2 - \frac{r+n}{r}\,w_{2m}\right) + q\left(\frac{t_{vh}}{24} - \frac{r+n}{r}\,w_{2m}\right) + \left(2 - \frac{t_{vh}}{24}\right)\frac{24\,(r+n)\,w_{2m}\,v - r\,t_{vh}\,q}{24\,(r+n) - r\,t_{vh}}$

Situasija III; $B - C$: $a_2 = w_{2m}\left(2 - \frac{r+n}{r}\,w_{2m}\right)$

Situacija IV; $C - D$: $a_2 = \frac{r\,t_{vh}}{24}\,\frac{2\cdot 24 - t_{vh}}{24\,(r+n) - r\,t_{vh}}\,(1 - w_{2m})$

B. $a'_{k1} < a'_{1\max}$

$$k = \frac{r}{r+n}\,\frac{q}{v}\left(1 - \sqrt{1 - \frac{r+n}{r}\,\frac{a'_{k1}}{q}}\right)$$

$$l = \frac{q}{v}\left[1 - \frac{a'_{k1}}{r\,t_{vh}}\,\frac{24}{r\,t_{vh}}\,\frac{24\,(r+n) - r\,t_{vh}}{2\cdot 24 - t_{vh}}\right]$$

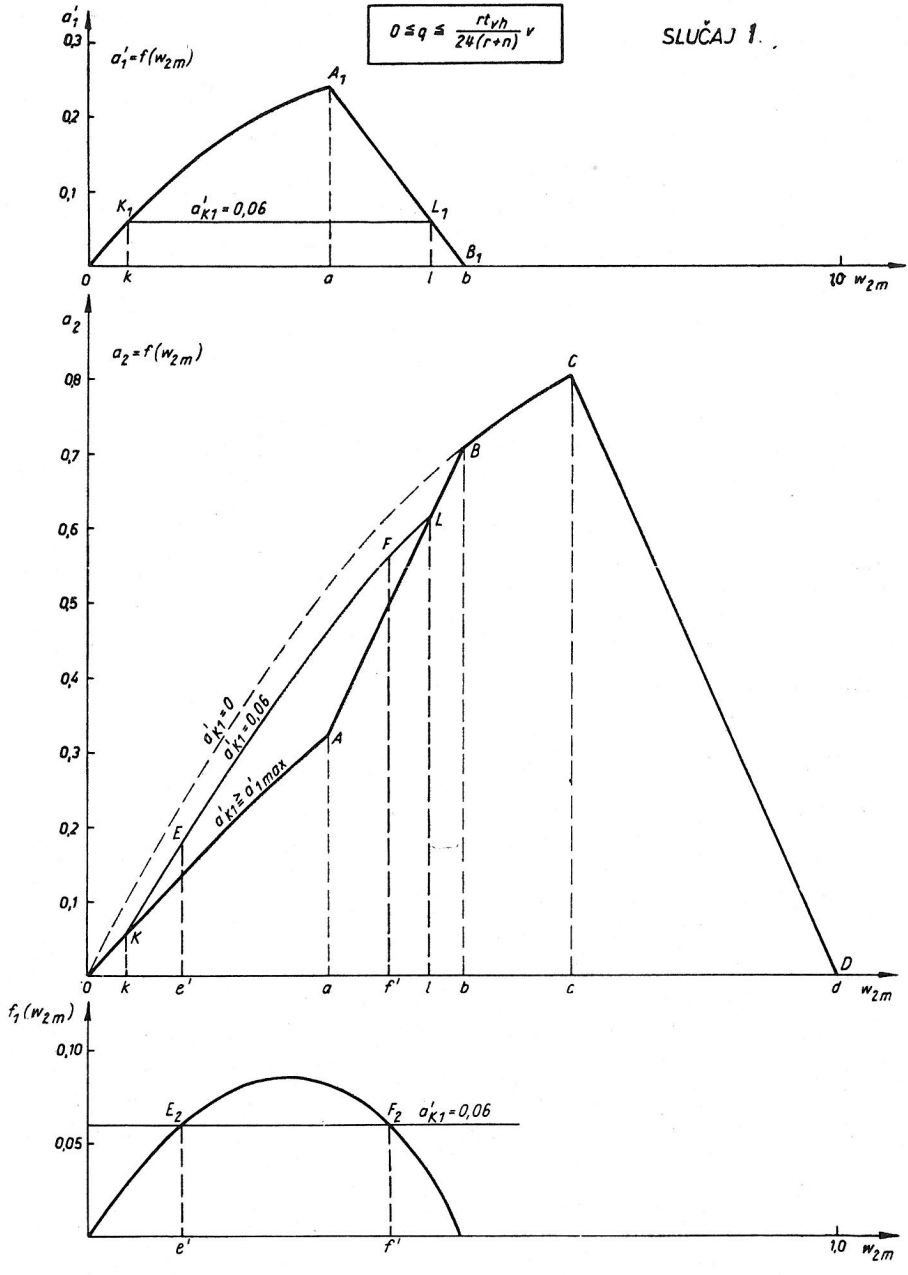
$$f_1(w_{2m}) = \frac{q - v\,w_{2m}}{1 - w_{2m}}\,w_{2m}\left(2 - \frac{r+n}{r}\,w_{2m}\right)$$

$$e' : a'_{k1} = f_1(w_{2m});\quad f' : a'_{k1} = f_1(w_{2m})$$

$$t'_{v1} = 12\left[\left(2 + \frac{a'_{k1}}{q - w_{2m}\,v}\right) - \sqrt{\left(2 + \frac{a'_{k1}}{q - w_{2m}\,v}\right)^2 - 4\,\frac{r+n}{r}\,\frac{a'_{k1}}{q - w_{2m}\,v}}\right]$$

Situacija XIV; $K - E$, $F - L$: $a_2 = w_{2m}\,(1 - v)\left(2 - \frac{r+n}{r}\,w_{2m}\right) + \left(2 - \frac{t'_{v1}}{24}\right)\frac{24\,(r+n)\,w_{2m}\,v - r\,t'_{v1}\,q}{24\,(r+n) - r\,t'_{v1}} + \left(\frac{t'_{v1}}{24} - \frac{r+n}{r}\,w_{2m}\right)q$

Situacija XV; $E - F$: $a_2 = \left(2 - \frac{r+n}{r}\,w_{2m}\right)\left[w_{2m}\,(1 - v) + \frac{24\,(r+n)\,w_{2m}\,v - r\,t'_{v1}\,q}{24\,(r+n) - r\,t'_{v1}}\right]$



Sl. 26. Potrebna relativna energetska vrijednost akumulacija za uzvodnu i nizvodnu hidroelektranu u ovisnosti o relativnoj mogućoj proizvodnji nizvodne hidroelektrane za slučaj 1 (Primjer za $v = 0,60$ i $q = 0,30$).

vrijednosti akumulacije uzvodne hidroelektrane $a'_1 = f(w_{2m})$ kao i vrijednosti akumulacije nizvodne hidroelektrane $a_2 = f(w_{2m})$ za $a'_{k1} = 0$ prema relacijama (65) i (69), uzevši u obzir za prvu ovisnost i relacije (108) i (109). Time su određene četiri osnovne granične relativne proizvodnje (na sl. 26 označene s a, b, c i d) koje ovise o načinu proizvodnje u uzvodnoj (a i b) i nizvodnoj hidroelektrani (c i d). Spomenute krivulje odgovaraju krivulji na sl. 20, dok za a i c odgovaraju vrijednosti w'_m (82), što je vidljivo i iz tabele 1. Za relativne proizvodnje $w_{2m} < a$, obje hidroelektrane mogu cijelu proizvodnju ostvariti kao varijabilnu energiju, za $a < w_{2m} < b$ uzvodna hidroelektrana mora proizvoditi i konstantnu energiju (ako se ne želi da dođe do gubitka vode), dok nizvodna hidroelektrana može i dalje proizvoditi samo varijabilnu energiju. Daljnjim povećanjem w_{2m} ($b < w_{2m} < c$) uzvodna hidroelektrana radi puno opterećena, dok nizvodna hidroelektrana još uvijek može cijelu proizvodnju ostvariti kao varijabilnu energiju. Tek kad je $c < w_{2m} < d$, nizvodna hidroelektrana pored varijabilne mora proizvoditi i konstantnu energiju, dok je uzvodna hidroelektrana i sada potpuno opterećena. Kad postane $w_{2m} = d$, obje su hidroelektrane konstantno opterećene punom snagom. Takve odnose među načinima proizvodnje možemo ostvariti sve dok tačka b ne padne skupa s tačkom c, a to je ostvareno ako je

$$0 \leqq q \leqq \frac{r t_{vh}}{24\,(r+n)} - v \tag{112}$$

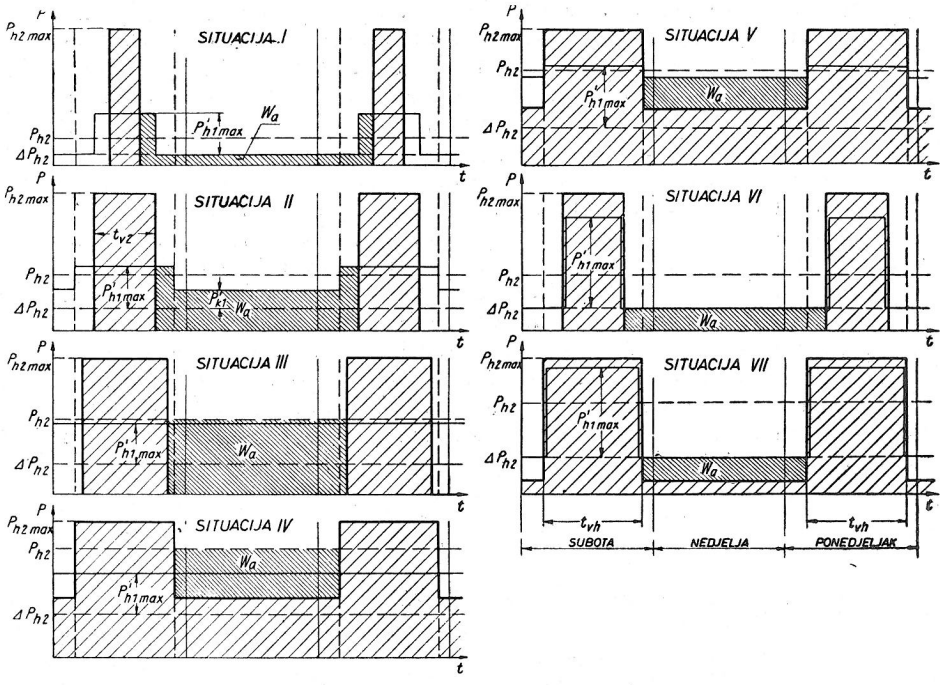
Da bismo odredili potrebnu vrijednost akumulacije, pođimo od situacija koje se pojavljuju između graničnih relativnih proizvodnji. U slučaju 1 (112) pojavljuju se četiri situacije (I do IV), koje su prikazane na sl. 27a. Potrebna energetska vrijednost akumulacije označena je s W_a (gušće iscrtane površine), s ΔP_{h2} označena je srednja snaga međudotoka između brane uzvodne hidroelektrane i zahvata nizvodne hidroelektrane, dok je s P_{h2} označena ukupna srednja snaga dotoka nizvodnoj hidroelektrani. U dijagramima na sl. 27a prikazana je snaga koju bi davala nizvodna hidroelektrana, kad ne bi imala vlastitu akumulaciju, kao suma snage ΔP_{h2} i snage uzvodne hidroelektrane preračunate na pad nizvodne hidroelektrane. Pored toga, na dijagramima je prikazano i opterećenje nizvodne hidroelektrane (iscrtana površina), uz zahtjev da se postigne što veća proizvodnja varijabilne energije. Pomoću dijagrama na sl. 27a može se za svaku situaciju odrediti relativna energetska vrijednost potrebne akumulacije.

Primjera radi, pokažimo kako je određena relativna vrijednost akumulacije za situaciju II. Potrebnu energetsku vrijednost akumulacije W_a možemo prikazati relacijom (s oznakama na sl. 27a)

$$W_a = (2 \cdot 24 - t_{v2})\,\Delta P_{h2} + (t_{vh} - t_{v2})\,P'_{h\,1\max} + (2 \cdot 24 - t_{vh})\,P'_{k1} \tag{113}$$

Koristeći relaciju (59), uzimajući u obzir da veličina t_{v2} odgovara veličini t'_{vh}, kao i relaciju (111), dobivamo da je

$$t_{v2} = 24 \frac{r+n}{r} w_{2m} \tag{114}$$



Sl. 27a. Situacija rasporeda reguliranih protoka za određivanje potrebne relativne energetske vrijednosti nizvodne akumulacije uz pretpostavku da je relativna energetska vrijednost uzvodne akumulacije veća od maksimalno potrebne (situacije I—VII)

Veličinu ΔP_{h2} možemo prikazati izrazom

$$\Delta P_{h2} = \frac{W_{h2m}(1-v)}{24(r+n)} \tag{115}$$

pa je — koristeći (111) —

$$\Delta P_{h2} = P_{h2\max}(1-v) w_{2m} \tag{116}$$

Za $P'_{h1\max}$ uzimajući u obzir (105) možemo pisati

$$P'_{h1\max} = qP_{h2\max} \tag{117}$$

dok se za određivanje veličine P'_{k1} možemo poslužiti relacijom (66), koju možemo napisati u obliku

$$P'_{k1} = \frac{W'_{h1m} - r t_{vh} P'_{h1\max}}{24(r+n) - r t_{vh}} \tag{118}$$

uzimajući još u obzir da je $W'_{h1m} = v\, W_{h2m}$, zatim relacije (105) i (111), pa dijeleći i množeći prvi član u brojniku s 24 $P_{h2\max}$ $(r+n)$, a drugi član u brojniku s $P_{h2\max}$, konačno dobivamo da je

$$P'_{k1} = P_{h2\max} \frac{24(r+n)\, w_{2m}\, v - r t_{vh}\, q}{24(r+n) - r t_{vh}} \tag{119}$$

Uvrštavanjem vrijednosti iz (114), (116), (117) i (119) u (113), pa dijeljenjem s $24 P_{h2\max}$, da bi se dobila relativna vrijednost akumulacije, dobit ćemo izraz za a_2, koji je za situaciju II naveden u tabeli 1.

Na analogan način određujemo izraze za relativnu vrijednost akumulacije i za ostale situacije, a svi su izrazi navedeni u tabeli 1 za slučaj 1, a ovisnosti o w_{2m} za $v = 0{,}6$ i $q = 0{,}3$, prikazane su na sl. 26.

Pored navedenih veličina za određivanje a_2 za ostale situacije potrebne su i veličine

Tab. 2. Formule za određivanje potrebne relativne energetske vrijednosti akumulacija za uzvodnu i nizvodnu hidroelektranu za slučaj 2 (uz sl. 28).

Slučaj 2.

$$\boxed{\frac{r t_{vh}}{24(r+n)} v \leqq q \leqq v}$$

$$\boxed{a'_1 = f(w_{2m})}$$

kao slučaj 1.

$$\boxed{a_2 = f(w_{2m})}$$

A. $a'_{k1} \geqq a'_{1\max}$

$$c = \frac{r t_{vh}}{24(r+n)}\ ;\ d = 1$$

Situacija I; $O - A$: $a_2 = w_{2m}(1-v)\left(2 - \frac{r+n}{r} w_{2m}\right) + \frac{r+n}{r}(v-q)\, w_{2m}$

Situacija II; $A - C$: $a_2 = w_{2m}(1-v)\left(2 - \frac{r+n}{r} w_{2m}\right) + q\left(\frac{t_{vh}}{24} - \frac{r+n}{r} w_{2m}\right) + \left(2 - \frac{t_{vh}}{24}\right) \frac{24(r+n)\, w_{2m}\, v - r t_{vh}\, q}{24(r+n) - r t_{vh}}$

Situacija V; $C - B$: $a_2 = \left(2 - \frac{t_{vh}}{24}\right) \frac{r\, t_{vh}\, [(1 - q) - w_{2m}(1 - v)]}{24\,(r + n) - r\, t_{vh}}$

Situacija IV; $B - D$: $a_2 = \frac{r\, t_{vh}}{24} \frac{2 \cdot 24 - t_{vh}}{24\,(r + n) - r\, t_{vh}} (1 - w_{2m})$

$B.$ $a'_{k1} < a'_{1\max}$

$$k = \frac{r}{r + n} \frac{q}{v} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{r + n}{r} \frac{a'_{k1}}{q}}\right)$$

$$l = \frac{q}{v} \left[1 - \frac{a'_{k1}}{q} \frac{24}{r\, t_{vh}} \frac{24\,(r + n) - r\, t_{vh}}{2 \cdot 24 - t_{vh}}\right]$$

$$f_1(w_{2m}) = \frac{q - v\, w_{2m}}{1 - w_{2m}} w_{2m} \left(2 - \frac{r + n}{r} w_{2m}\right); \quad e' : a'_{k1} = f_1(w_{2m})$$

$$t'_{v1} = 12 \left[2 + \frac{a'_{k1}}{q - w_{2m}\, v} - \sqrt{\left(2 + \frac{a'_{k1}}{q - w_{2m}\, v}\right)^2 - 4 \frac{r + n}{r} \frac{a'_{k1}}{q - w_{2m}\, v}}\right]$$

Situacija XIV; $K - E$: $a_2 = w_{2m}(1 - v)\left(2 - \frac{r + n}{r} w_{2m}\right) +$

$$+ \left(2 - \frac{t'_{v1}}{24}\right) \frac{24\,(r + n)\, w_{2m}\, v - r\, t'_{v1}\, q}{24\,(r + n) - r\, t'_{v1}} + \left(\frac{t'_{v1}}{24} - \frac{r + n}{r} w_{2m}\right) q$$

Situacija XV; $E - C'$: $a_2 = \left(2 - \frac{r + n}{r} w_{2m}\right) \left[w_{2m}(1 - v) + \right.$

$$\left. + \frac{24\,(r + n)\, w_{2m}\, v - r\, t'_{v1}\, q}{24\,(r + n) - r\, t'_{v1}}\right]$$

Situacija XVI; $C' - L$: $a_2 = \left(2 - \frac{t_{vh}}{24}\right) \left[w_{2m} - \frac{r\, t'_{v1}\,(q - w_{2m}\, v)}{24\,(r + n) - r\, t'_{v1}} - \right.$

$$\left. - \frac{24\,(r + n)\, w_{2m} - r\, t_{vh}}{24\,(r + n) - r\, t_{vh}}\right]$$

Tab. 3. Formule za određivanje potrebne relativne energetske vrijednosti akumulacija za uzvodnu i nizvodnu hidroelektranu za slučaj 3 (uz sl. 29).

Slučaj 3

$$\boxed{v \leqq q \leqq \frac{24\,(r + n)\, v}{24\,(r + n)\, v + r\, t_{vh}(1 - v)}}$$

$$\boxed{a'_1 = f(w_{2m})}$$

kao slučaj 1.

$$\boxed{a_2 = f(w_{2m})}$$

$A.$ $a'_{k1} \geqq a'_{1\max}$

$$c = \frac{r\, t_{vh}}{24\,(r + n)}; \quad d = 1; \quad g = \frac{1 - q}{1 - v}; \quad h = \frac{24\,(r + n) - r\, t_{vh}(1 - q)}{24\,(r + n) - r\, t_{vh}(1 - v)}$$

Situacija VI; $O - C$: $a_2 = w_{2m}(1 - v)\left(2 - \frac{r + n}{r} w_{2m}\right)$

Situacija VII; $C - A$: $a_2 = \left(2 - \frac{t_{vh}}{24}\right)\left[\frac{r\, t_{vh}(1 - w_{2m})}{24(r + n) - r\, t_{vh}} - w_{2m} v\right]$

Situacija V; $A - G$: $a_2 = \left(2 - \frac{t_{vh}}{24}\right) \frac{r\, t_{vh}[(1 - q) - w_{2m}(1 - v)]}{24(r + n) - r\, t_{vh}}$

Situacija VIII; $G - D$: $a_2 = \left(2 - \frac{t_{vh}}{24}\right) \frac{r\, t_{vh}[w_{2m}(1 - v) - (1 - q)]}{24(r + n) - r\, t_{vh}}$

Situacija IX; $D - H$: $a_2 = \left(2 - \frac{t_{vh}}{24}\right)\left[1 - w_{2m} + \frac{r\, t_{vh}(q - w_{2m} v)}{24(r + n) - r\, t_{vh}}\right]$

B: $a'_{k1} < a'_{1\max}$

$$k = \frac{r}{r + n} \frac{q}{v}\left(1 - \sqrt{1 - \frac{r + n}{r} \frac{a'_{k1}}{q}}\right)$$

$$l = \frac{q}{v}\left[1 - \frac{a'_{k1}}{q} \frac{24}{r\, t_{vh}} \frac{24(r + n) - r\, t_{vh}}{2 \cdot 24 - t_{vh}}\right]$$

$$f_2(w_{2m}) = 12 \frac{r + n}{r}\left\{1 - \frac{r\, t_{vh}}{24(r + n)} + \frac{q - w_{2m} v}{w_{2m}(1 - v) - (1 - q)} - \right.$$

$$\left. - \sqrt{\left[1 - \frac{r\, t_{vh}}{24(r + n)} + \frac{q - w_{2m} v}{w_{2m}(1 - v) - (1 - q)}\right]^2 - 4 \frac{r\, t_{vh}}{24(r + n)} \frac{1 - w_{2m}}{w_{2m}(1 - v) - (1 - q)}}\right\}$$

$$f_3(w_{2m}) = \frac{24(r + n)(1 - w_{2m})\, t_{vh}}{[24(r + n) - r\, t_{vh}](q - w_{2m} v) + r\, t_{vh}(1 - w_{2m})}$$

$$f_4(w_{2m}) = 24 \frac{r + n}{r} \frac{1 - w_{2m}}{1 - q - w_{2m}(1 - v)}$$

$$t'_{v1} = 12\left[2 + \frac{a'_{k1}}{q - w_{2m} v} - \sqrt{\left(2 + \frac{a'_{k1}}{q - w_{2m} v}\right)^2 - 4 \frac{r + n}{r} \frac{a'_{k1}}{q - w_{2m} v}}\right]$$

$$e' : f_2(w_{2m}) = t'_{v1}; \quad f' : f_3(w_{2m}) = t'_{v1}; \quad h' : f_4(w_{2m}) = t'_{v1}$$

Situacija XV; $K - C'$: $a_2 = \left(2 - \frac{r + n}{r} w_{2m}\right)\left[w_{2m}(1 - v) + \right.$

$$\left. + \frac{24(r + n) w_{2m} v - r\, t'_{v1}\, q}{24(r + n) - r\, t'_{v1}}\right]$$

Situacija XVI; $C' - E'$: $a_2 = \left(2 - \frac{t_{vh}}{24}\right)\left[w_{2m} - \frac{r\, t'_{v1}(q - w_{2m} v)}{24(r + n) - r\, t'_{v1}} - \right.$

$$\left. - \frac{24(r + n) w_{2m} - r\, t_{vh}}{24(r + n) - r\, t_{vh}}\right]$$

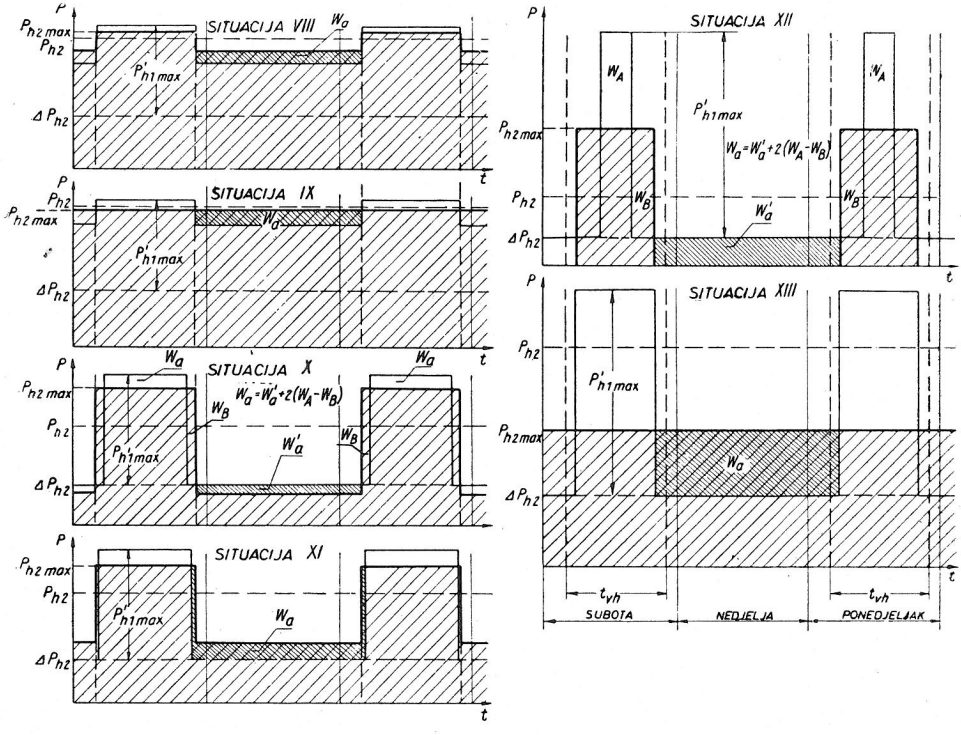
Situacija XVII; $E' - F'$: $a_2 = \left(2 - \frac{t_{vh}}{24}\right)\left[w_{2m} - \frac{r\, t'_{v1}(q - w_{2m} v)}{24(r + n) - r\, t'_{v1}} - \right.$

$$\left. - \frac{24(r + n) w_{2m} - r\, t_{vh}}{24(r + n) - r\, t_{vh}}\right] + 2 \frac{t'_{v1}}{24} \frac{24(r + n)(q - w_{2m} v)}{24(r + n) - r\, t'_{v1}} -$$

$$- \frac{t_{vh} + t'_{v1}}{24} \frac{24(r + n)(1 - w_{2m}) + r\, t'_{v1}[q - 1 + w_{2m}(1 - v)]}{24(r + n) - r\, t'_{v1}}$$

Slučaj XVIII; $F' - D'$: $$a_2 = \left(2 - \frac{t'_{v1}}{24}\right)\left[w_{2m}\, v - \frac{r\, t_{vh}\,(1 - w_{2m})}{24\,(r+n) - r\, t_{vh}} - \frac{24\,(r+n)\, w_{2m}\, v - r\, t'_{v1}\, q}{24\,(r+n) - r\, t'_{v1}}\right] + \frac{t_{vh} - t'_{v1}}{24}\;\frac{24\,(r+n)\,(1 - w_{2m})}{24\,(r+n) - r\, t_{vh}}$$

Slučaj XIX; $D' - L$: $$a_2 = \left(2 - \frac{t'_{v1}}{24}\right)\left[1 - w_{2m} + \frac{r\, t'_{v1}\,(q - w_{2m} v)}{24\,(r+n) - r\, t'_{v1}}\right]$$



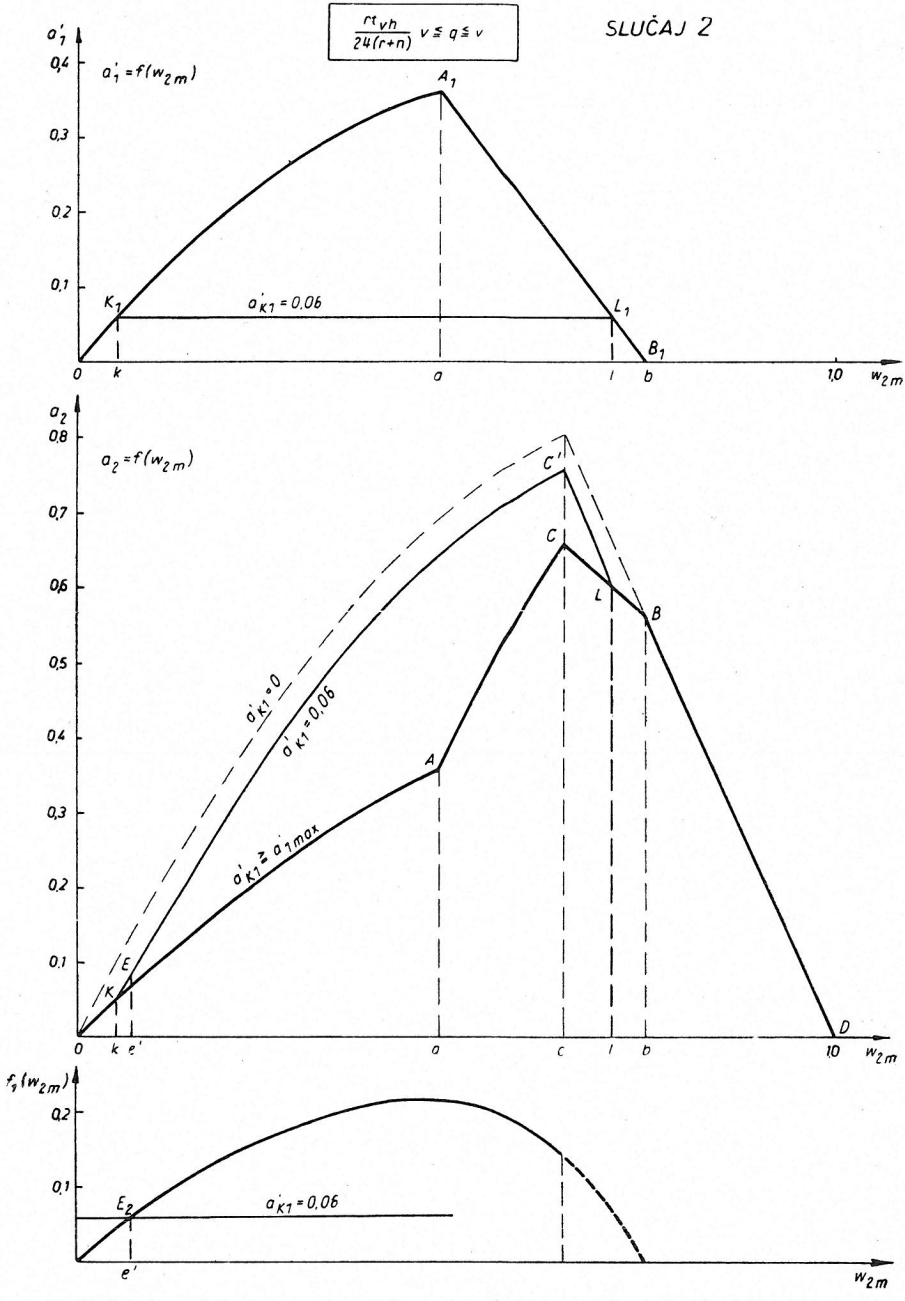
Sl. 27b. Situacija rasporeda reguliranih protoka za određivanje potrebne relativne energetske vrijednosti nizvodne akumulacije uz pretpostavku da je relativna energetska vrijednost uzvodne akumulacije veća od maksimalno potrebne (situacija VIII—XIII).

$$t_{v1} = 24\,\frac{r+n}{r}\cdot\frac{v}{q}\;w_{2m} \tag{120}$$

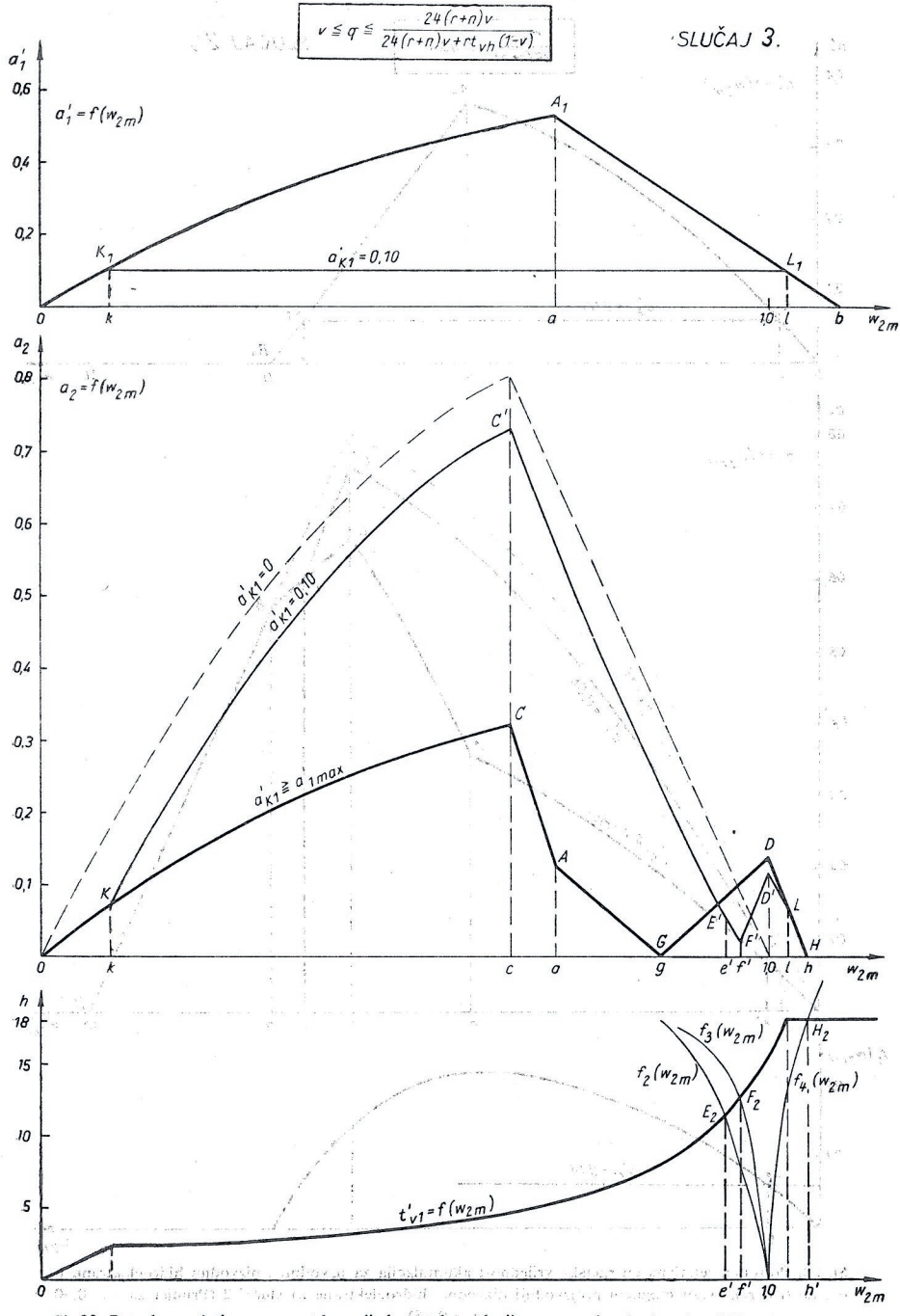
i

$$P_{k2} = P_{h2\max}\,\frac{24\,(r+n)\, w_{2m} - r t_{vh}}{24\,(r+n) - r t_{vh}}\,. \tag{121}$$

Na sl. 28 prikazane su ovisnosti $a'_1 = f(w_{2m})$ i $a_2 = f(w_{2m})$ za slučaj 2 kad je



Sl. 28. Potrebna relativna energetska vrijednost akumulacija za uzvodnu i nizvodnu hidroelektranu u ovisnosti o relativnoj mogućoj proizvodnji nizvodne hidroelektrane za slučaj 2 (Primjer za $v = 0,60$ i $q = 0,45$)



Sl. 29. Potrebna relativna energetska vrijednost akumulacija za uzvodnu i nizvodnu hidroelektranu u ovisnosti o relativnoj mogućoj proizvodnji nizvodne hidroelektrane za slučaj 3 (Primjer za $v = 0,60$ i $q = 0,66$).

$$\frac{r t_{vh}}{24\,(r+n)}\,v \leqq q \leqq v \tag{122}$$

dakle, za slučaj kad tačka b (sl. 28) pada između tačaka c i d, odnosno kad se uzvodna hidroelektrana može koristiti trajno s punom snagom, te kad se u nizvodnoj hidroelektrani proizvodi i konstantna i varijabilna energija. Sada se pored situacije I, II i IV pojavljuje i situacija V (sl. 27a), kada se i u uzvodnoj i u nizvodnoj hidroelektrani pored varijabilne mora proizvoditi i konstantna energija. Analitički izraz za $a_2 = f(w_{2m})$ se radi toga nešto mijenja (tabela 2).

Treći slučaj (sl. 29) nastupa kad je $b \geqq d$ i $a \leqq g$, pa vrijedi

$$v \leqq q \leqq \frac{24\,(r+n)\,v}{24\,(r+n)\,v + r t_{vh}\,(1-v)} \tag{123}$$

Sada mogućnost punog korištenja nizvodne hidroelektrane nastupa pri manjim protocima nego mogućnost punog iskorištenja uzvodne hidroelektrane, ali ne može doći do situacije kad je $W_A > W_E$.

Tab. 4. Formule za određivanje potrebne relativne energetske vrijednosti akumulacija za uzvodnu i nizvodnu hidroelektranu za slučaj 4 (uz sl. 30).

Slučaj 4.

$$\boxed{\frac{24\,(r+n)\,v}{24\,(r+n)\,v + r t_{vh}\,(1-v)} \leqq q \leqq v\,\frac{24\,(r+n) - r t_{vh}\,(1-v)}{24\,(r+n)\,(2v-1) + r t_{vh}\,(1-v)}}$$

$$\boxed{a'_1 = f(w_{2m})}$$

kao slučaj 1.

$$\boxed{a_2 = f(w_{2m})}$$

A. $a'_{k1} \geqq a'_{1\max}$

$$c = \frac{r t_{vh}}{24\,(r+n)}\,; \quad d = 1$$

$$e = -\frac{1}{2}\,\frac{24\,(r+n)\,(2q-1)\,v + r t_{vh}\,(1-v)\,q}{24\,(r+n)\,(1-v)\,v} + \sqrt{\frac{1}{4}\left[\frac{24\,(r+n)\,(2q-1)\,v + r t_{vh}\,(1-v)\,q}{24\,(r+n)\,(1-v)\,v}\right]^2 + \frac{r t_{vh}\,q}{24\,(r+n)\,(1-v)\,v}}$$

$$f = \frac{r t_{vh}}{24\,(r+n)\,v + r t_{vh}\,(1-v)}\,; \quad h = \frac{24\,(r+n) - r t_{vh}\,(1-q)}{24\,(r+n) - r t_{vh}\,(1-v)}$$

Situacija VI; $O - C$: $a_2 = w_{2m}(1 - v)\left(2 - \frac{r + n}{r} w_{2m}\right)$

Situacija VII; $C - E$: $a_2 = \left(2 - \frac{t_{vh}}{24}\right)\left[\frac{r\, t_{vh}(1 - w_{2m})}{24(r + n) - r\, t_{vh}} - w_{2m}\, v\right]$

Situacija X; $E - F$: $a_2 = \left(2 - \frac{t_{vh}}{24}\right)\left[\frac{r\, t_{vh}(1 - w_{2m})}{24(r + n) - r\, t_{vh}} - w_{2m}\, v\right] +$

$$+ \frac{r + n}{r} w_{2m} \frac{v}{q}[2q - 1 + w_{2m}(1 - v)] - \frac{t_{vh}}{24}[1 - w_{2m}(1 - v)]$$

Situacija XI; $F - A$: $a_2 = \left(2 - \frac{t_{vh}}{24}\right)\left[w_{2m}\, v - \frac{r\, t_{vh}(1 - w_{2m})}{24(r + n) - r\, t_{vh}}\right] +$

$$+ [1 - w_{2m}(1 - v)]\left(\frac{t_{vh}}{24} - \frac{r + n}{r}\frac{v}{q} w_{2m}\right)$$

Situacija VIII; $A - D$: $a_2 = \left(2 - \frac{t_{vh}}{24}\right)\frac{r\, t_{vh}[w_{2m}(1 - v) - (1 - q)]}{24(r + n) - r\, t_{vh}}$

Situacija IX; $D - H$: $a_2 = \left(2 - \frac{t_{vh}}{24}\right)\left[1 - w_{2m} + \frac{r\, t_{vh}(q - w_{2m}\, v)}{24(r + n) - r\, t_{vh}}\right]$

B. $a'_{k1} < a'_{1\max}$

$$k = \frac{r}{r + n}\frac{q}{v}\left(1 - \sqrt{1 - \frac{r + n}{r}\frac{a'_{k1}}{q}}\right); \quad l = \frac{q}{v}\left[1 - \frac{a'_{k1}}{q}\frac{24}{r\, t_{vh}}\frac{24(r + n) - r\, t_{vh}}{2 \cdot 24 - t_{vh}}\right]$$

$$f_2(w_{2m}) = 12\frac{r + n}{r}\left\{1 - \frac{r\, t_{vh}}{24(r + n)} + \frac{q - w_{2m}\, v}{w_{2m}(1 - v) - (1 - q)} - \right.$$

$$\left. - \sqrt{\left[1 - \frac{r\, t_{vh}}{24(r + n)} + \frac{q - w_{2m}\, v}{w_{2m}(1 - v) - (1 - q)}\right]^2 - 4\frac{r\, t_{vh}}{24(r + n)}\frac{1 - w_{2m}}{w_{2m}(1 - v) - (1 - q)}}\right\}$$

$$f_3(w_{2m}) = \frac{24(r + n)(1 - w_{2m})\, t_{vh}}{[24(r + n) - r\, t_{vh}](q - w_{2m}\, v) + r\, t_{vh}(1 - w_{2m})}$$

$$f_4(w_{2m}) = 24\frac{r + n}{r}\frac{1 - w_{2m}}{1 - q - w_{2m}(1 - v)}$$

$$t'_{v1} = 12\left[2 + \frac{a'_{k1}}{q - v\, w_{2m}} - \sqrt{\left(2 + \frac{a'_{k1}}{q - v\, w_{2m}}\right)^2 - 4\frac{r + n}{r}\frac{a'_{k1}}{q - v\, w_{2m}}}\right]$$

$$e' : f_2(w_{2m}) = t'_{v1}; \quad f' : f_3(w_{2m}) = t'_{v1}; \quad h' : f_4(w_{2m}) = t'_{v1}$$

Situacija XV; $K - C'$: $a_2 = \left(2 - \frac{r + n}{r} w_{2m}\right)\left[w_{2m}(1 - v) + \right.$

$$\left. + \frac{24(r + n)\, v\, w_{2m} - r\, t'_{v1}\, q}{24(r + n) - r\, t'_{v1}}\right]$$

Situacija XVI; $C' - E'$: $a_2 = \left(2 - \frac{t_{vh}}{24}\right)\left[w_{2m} - \frac{r\, t'_{v1}(q - w_{2m}\, v)}{24(r + n) - r\, t'_{v1}} - \right.$

$$\left. - \frac{24(r + n)\, w_{2m} - r\, t_{vh}}{24(r + n) - r\, t_{vh}}\right]$$

Situacija XVII; $E' - F'$: $$a_2 = \left(2 - \frac{t_{vh}}{24}\right)\left[w_{2m} - \frac{r\,t'_{v1}\,(q - w_{2m}\,v)}{24\,(r+n) - r\,t'_{v1}} - \frac{24\,(r+n)\,w_{2m} - r\,t_{vh}}{24\,(r+n) - r\,t_{vh}}\right] + 2\,\frac{t'_{v1}}{24}\,\frac{24\,(r+n)\,(q - w_{2m}\,v)}{24\,(r+n) - r\,t'_{v1}} - \frac{t_{vh} + t'_{v1}}{24}\,\frac{24\,(r+n)\,(1 - w_{2m}) + r\,t'_{v1}\,[q - 1 + w_{2m}\,(1 - v)]}{24\,(r+n) - r\,t'_{v1}}$$

Situacija XVIII; $F' - D'$: $$a_2 = \left(2 - \frac{t'_{v1}}{24}\right)\left[w_{2m}\,v - \frac{r\,t_{vh}\,(1 - w_{2m})}{24\,(r+n) - r\,t_{vh}} - \frac{24\,(r+n)\,w_{2m}\,v - r\,t'_{v1}\,q}{24\,(r+n) - r\,t'_{v1}}\right] + \frac{t_{vh} - t'_{v1}}{24}\,\frac{24\,(r+n)\,(1 - w_{2m})}{24\,(r+n) - r\,t_{vh}}$$

Situacija XIX; $D' - H'$: $$a_2 = \left(2 - \frac{t'_{v1}}{24}\right)\left[1 - w_{2m} + \frac{r\,t'_{v1}\,(q - w_{2m}\,v)}{24\,(r+n) - r\,t'_{v1}}\right]$$

Značenje W_A i W_B vidljivo je na sl. 27 b, situacija X. Slučaj 3 razlikuje se od prethodnih slučajeva (1 i 2) i pri malim w_{2m}, jer je sada $t_{v1} < t_{v2}$ (situacija VI i VII), dok je ranije uvijek bila ispunjena relacija $t_{v1} > t_{v2}$ (situacija I i II). I u slučaju 3 imaju utjecaja granične veličine a, c i d, kao i u slučajevima 1 i 2, dok veličina b — kako će se vidjeti — nema utjecaja. Granična veličina g karakterizirana je jednakostima $P_{k2} = P'_{k1} + \Delta P_{h2}$ i $P_{h2\,\max} = P'_{h1\,\max} + \Delta P_{h2}$, gdje je P_{k2} konstantna snaga nizvodne hidroelektrane. Tada je $a_2 = 0$. Za $a < w_m < g$ pojavljuje se situacija V (sl. 27a). Za $w_{2m} > g$ (situacije VIII i IX) u razdobljima malih opterećenja akumulacioni bazen se prazni mjesto da se puni kako je to bilo u do sada razmatranim situacijama. Radi toga imamo povećanje potrebne akumulacije s porastom w_{2m} sve dok ne postane $w_{2m} = d = 1$. Za $w_{2m} > 1$ pojavljuje se situacija IX, a postaje $a_2 = 0$, kad je ispunjena relacija $P_{h2\,\max} = P'_{k1} + \Delta P_{h2}$, a to je postignuto za $w_{2m} < b$, pa radi toga veličina b nema utjecaja na potrebnu vrijednost akumulacije.

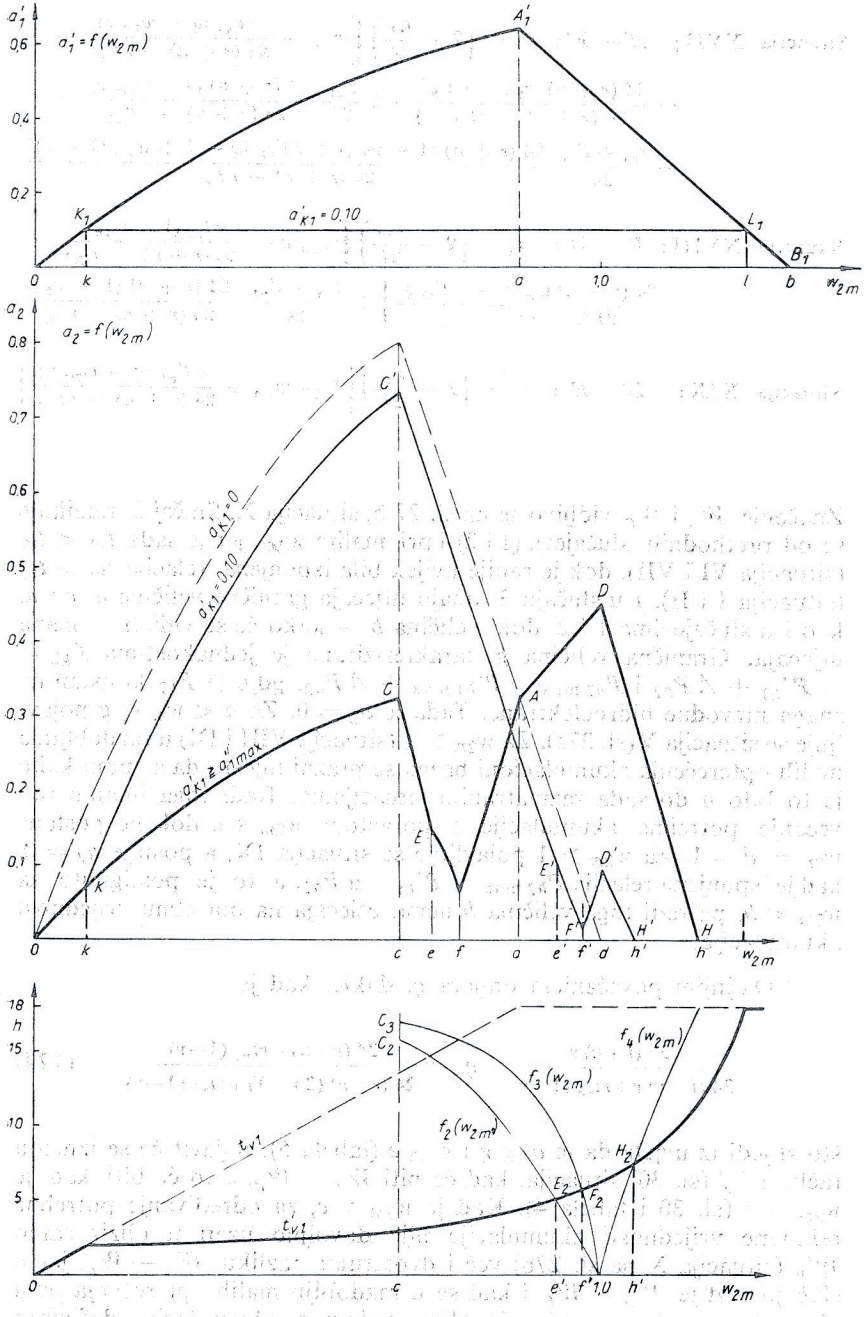
Daljnjim povećanjem omjera q, dakle, kad je

$$\frac{24\,(r+n)\,v}{24\,(r+n)\,v + r t_{vh}\,(1-v)} \leqq q \leqq v\,\frac{24\,(r+n) - r t_{vh}\,(1-v)}{24\,(r+n)\,(2\,v-1) + r t_{vh}\,(1-v)} \tag{124}$$

što slijedi iz uvjeta da je $a \geqq g$ i $c \leqq e$ (tabela 5), pojavit će se između tačke c i f (sl. 30) situacija, kad će biti $W_A = W_B$, a to će biti kad je $w_{2m} = e$ (sl. 30 i tabela 4). Kad je $w_{2m} > e$, za određivanje potrebne relativne vrijednosti akumulacije nije dovoljno uzeti u obzir samo W'_a (situacija X na sl. 27b) već i dvostruku razliku $W_A - W_B$, jer u slučaju kad je $W_A > W_B$ i kad se u razdoblju malih opterećenja puni akumulacioni bazen nije dovoljan volumen akumulacije definiran energijom W'_a. Tada je, naime, potrebno imati veći raspoloživi volumen

$$\frac{24(r+n)v}{24(r+n)v+rt_{rh}(1-v)} \leq q \leq v\,\frac{24(r+n)+rt_{vh}(1-v)}{24(r+n)(2v-1)+rt_{vh}(1-v)}$$

SLUČAJ 4



Sl. 30. Potrebna relativna energetska vrijednost akumulacija za uzvodnu i nizvodnu hidroelektranu u ovisnosti o relativnoj mogućoj proizvodnji nizvodne hidroelektrane za slučaj 4 (Primjer za $v = 0,60$ i $q = 0,80$).

Tab. 5. Formule za određivanje potrebne relativne energetske vrijednosti akumulacija za uzvodnu i nizvodnu hidroelektranu za slučaj 5 (uz sl. 31).

Slučaj 5.

$$v\,\frac{24\,(r+n)-r\,t_{vh}\,(1-v)}{24\,(r+n)\,(2\,v-1)+r\,t_{vh}\,(1-v)} \leqq q \leqq \frac{v}{2\,v-1}$$

$$a'_1 = f\,(w_{2m})$$

kao slučaj 1.

$$a_2 = f\,(w_{2m})$$

A. $a'_{k1} \geqq a'_{1\max}$

$$c = \frac{r\,t_{vh}}{24\,(r+n)}\,; \quad d = 1$$

$$e = \frac{1}{1-v}\left(1-\frac{2\,q\,v}{q+v}\right); \quad f = \frac{r\,t_{vh}}{24\,(r+n)\,v + r\,t_{vh}\,(1-v)}$$

$$h = \frac{24\,(r+n)-r\,t_{vh}\,(1-q)}{24\,(r+n)-r\,t_{vh}\,(1-v)}$$

Situacija VI; $O-E$: $a_2 = w_{2m}\,(1-v)\left(2-\frac{r+n}{r}\,w_{2m}\right)$

Situacija XII; $E-C$: $a_2 = w_{2m}\,(1-v)\left(2-\frac{r+n}{r}\,w_{2m}\right) + \frac{r+n}{r}\,w_{2m}\left\{2\,v-\left(1+\frac{v}{q}\right)[1-w_{2m}\,(1-v)]\right\}$

Situacija X; $C-F$: $a_2 = \left(2-\frac{t_{vh}}{24}\right)\left[\frac{r\,t_{vh}\,(1-w_{2m})}{24\,(r+n)-r\,t_{vh}} - w_{2m}\,v\right] + \frac{r+n}{r}\,w_{2m}\,\frac{v}{q}\,[2\,q-1+w_{2m}\,(1-v)] - \frac{t_{vh}}{24}\,[1-w_{2m}\,(1-v)]$

Situacija XI; $F-D$: $a_2 = \left(2-\frac{t_{vh}}{24}\right)\left[w_{2m}\,v - \frac{r\,t_{vh}\,(1-w_{2m})}{24\,(r+n)-r\,t_{vh}}\right] + [1-w_{2m}\,(1-v)]\left(\frac{t_{vh}}{24} - \frac{r+n}{r}\,\frac{v}{q}\,w_{2m}\right)$

Situacija XIII; $D-A$: $a_2 = \left(2-\frac{r+n}{r}\,w_{2m}\,\frac{v}{q}\right)[1-w_{2m}\,(1-v)]$

Situacija IX; $A-G$: $a_2 = \left(2-\frac{t_{vh}}{24}\right)\left[1-w_{2m}+\frac{r\,t_{vh}\,(q-w_{2m}\,v)}{24\,(r+n)-r\,t_{vh}}\right]$

B. $a'_{k1} < a'_{1\max}$

$$k = \frac{r}{r+n}\,\frac{q}{v}\left(1+\sqrt{1-\frac{r+n}{r}\,\frac{a'_{k1}}{q}}\right)$$

$$l = \frac{q}{v}\left[1-\frac{a'_{k1}}{q}\,\frac{24}{r\,t_{vh}}\,\frac{24\,(r+n)-r\,t_{vh}}{2\cdot 24-t_{vh}}\right]$$

$$w_{2m} \leqq c : f_2(w_{2m}) = 12\,\frac{r+n}{r}\left\{1 - w_{2m} + \frac{q - w_{2m}\,v}{w_{2m}(1-v) - (1-q)} - \right.$$

$$\left. - \sqrt{\left[1 - w_{2m} + \frac{q - w_{2m}\,v}{w_{2m}(1-v) - (1-q)}\right]^2 - 4\,\frac{w_{2m}(1-w_{2m})}{w_{2m}(1-v) - (1-q)}}\right\}$$

$$w_{2m} \geqq c : f_2(w_{2m}) = 12\,\frac{r+n}{r}\left\{1 - \frac{r\,t_{vh}}{24\,(r+n)} + \frac{q - w_{2m}\,v}{w_{2m}(1-v) - (1-q)} - \right.$$

$$\left. - \sqrt{\left[1 - \frac{r\,t_{vh}}{24\,(r+n)} + \frac{q - w_{2m}\,v}{w_{2m}(1-v) - (1-q)}\right]^2 - 4\,\frac{r\,t_{vh}}{24\,(r+n)}\,\frac{1 - w_{2m}}{w_{2m}(1-v) - (1-q)}}\right\}$$

$$w_{2m} \geqq c : f_3(w_{2m}) = \frac{24\,(r+n)\,(1 - w_{2m})\,t_{vh}}{[24\,(r+n) - r\,t_{vh}]\,(q - w_{2m}\,v) + r\,t_{vh}\,(1 - w_{2m})}$$

$$f_4(w_{2m}) = 24\,\frac{r+n}{r}\,\frac{1 - w_{2m}}{1 - q - w_{2m}(1-v)}$$

$$t'_{v1} = 12\left[2 + \frac{a'_{k1}}{q - w_{2m}\,v} - \sqrt{\left(2 + \frac{a'_{k1}}{q - w_{2m}\,v}\right)^2 - 4\,\frac{r+n}{r}\,\frac{a'_{k1}}{q - w_{2m}\,v}}\right]$$

$$e' : f_2(w_{2m}) = t'_{v1}; \quad f' : f_3(w_{2m}) = t'_{v1}; \quad h' : f_4(w_{2m}) = t'_{v1}$$

Situacija XV; $K' - C'$: $$a_2 = \left(2 - \frac{r+n}{r}\,w_{2m}\right)\left[w_{2m}(1-v) + \frac{24\,(r+n)\,w_{2m}\,v - r\,t'_{v1}\,q}{24\,(r+n) - r\,t'_{v1}}\right]$$

Situacija XVI; $C' - E'$: $$a_2 = \left(2 - \frac{t_{vh}}{24}\right)\left[w_{2m} - \frac{r\,t'_{v1}\,(q - w_{2m}\,v)}{24\,(r+n) - r\,t'_{v1}} - \frac{24\,(r+n)\,w_{2m} - r\,t_{vh}}{24\,(r+n) - r\,t_{vh}}\right]$$

Situacija XVII; $E' - F'$: $$a_2 = \left(2 - \frac{t_{vh}}{24}\right)\left[w_{2m} - \frac{r\,t'_{v1}\,(q - w_{2m}\,v)}{24\,(r+n) - r\,t'_{v1}} - \frac{24\,(r+n)\,w_{2m} - r\,t_{vh}}{24\,(r+n) - r\,t_{vh}}\right] + 2\,\frac{t'_{v1}}{24}\,\frac{24\,(r+n)\,(q - w_{2m}\,v)}{24\,(r+n) - r\,t'_{v1}} - \frac{t_{vh} + t'_{v1}}{24}\,\frac{24\,(r+n)\,(1 - w_{2m}) + r\,t'_{v1}\,[q - 1 + w_{2m}(1-v)]}{24\,(r+n) - r\,t'_{v1}}$$

Situacija XVIII; $F' - D'$: $$a_2 = \left(2 - \frac{t'_{v1}}{24}\right)\left[w_{2m}\,v - \frac{r\,t_{vh}\,(1 - w_{2m})}{24\,(r+n) - r\,t_{vh}} - \frac{24\,(r+n)\,w_{2m}\,v - r\,t'_{v1}\,q}{24\,(r+n) - r\,t'_{v1}}\right] + \frac{t_{vh} - t'_{v1}}{24}\,\frac{24\,(r+n)\,(1 - w_{2m})}{24\,(r+n) - r\,t_{vh}}$$

Situacija XIX; $D' - H'$: $$a_2 = \left(2 - \frac{t'_{v1}}{24}\right)\left[1 - w_{2m} + \frac{r\,t'_{v1}\,(q - w_{2m}\,v)}{24\,(r+n) - r\,t'_{v1}}\right]$$

u akumulacionom bazenu, jer se sva količina vode koja ostane u akumulacionom bazenu za vrijeme perioda punjenja (W_A) ne može iskoristiti za vrijeme razdoblja pražnjenja (W_B) prije neradnog dana. To isto vrijedi za radni dan neposredno nakon neradnog dana. Situaciju X imamo sve dotle dok konstantna snaga nizvodne hidroelektrane ne

postane jednaka snazi dotoka ΔP_{h2} (tačka f na sl. 30). Za veće w_{2m} (situacija XI na sl. 27b) za vrijeme malih opterećenja potrebno je pražnjenje akumulacionog bazena, pa nema utjecaja razlika $W_A - W_B$

Povećanje omjera q dovodi do slučaja 5 (sl. 31), kad je

$$v \frac{24(r+n) - rt_{vh}(1-v)}{24(r+n)(2v-1) + rt_{vh}(1-v)} \leqq q \leqq \frac{v}{2v-1} \tag{125}$$

Tada se, naime, situacija kad je $W_A = W_B$ (tačka e na sl. 31 definirana izrazom u tabeli 5) nalazi između tačke 0 i c. Prema tomu, bit će $W_A > W_B$ za vrijednosti w_{2m} veće od e. Tada ćemo imati situaciju XII (sl. 27b), koja se od situacije X razlikuje u tome što nizvodna hidroelektrana ne proizvodi konstantne energije. Situacija XII pojavljuje se sve dok ne postane $w_{2m} = c$, nakon čega se pojavljuje situacija X. U slučaju 5 pojavljuje se i situacija XIII (sl. 27b), koja nastupa kad je $a > 1$.

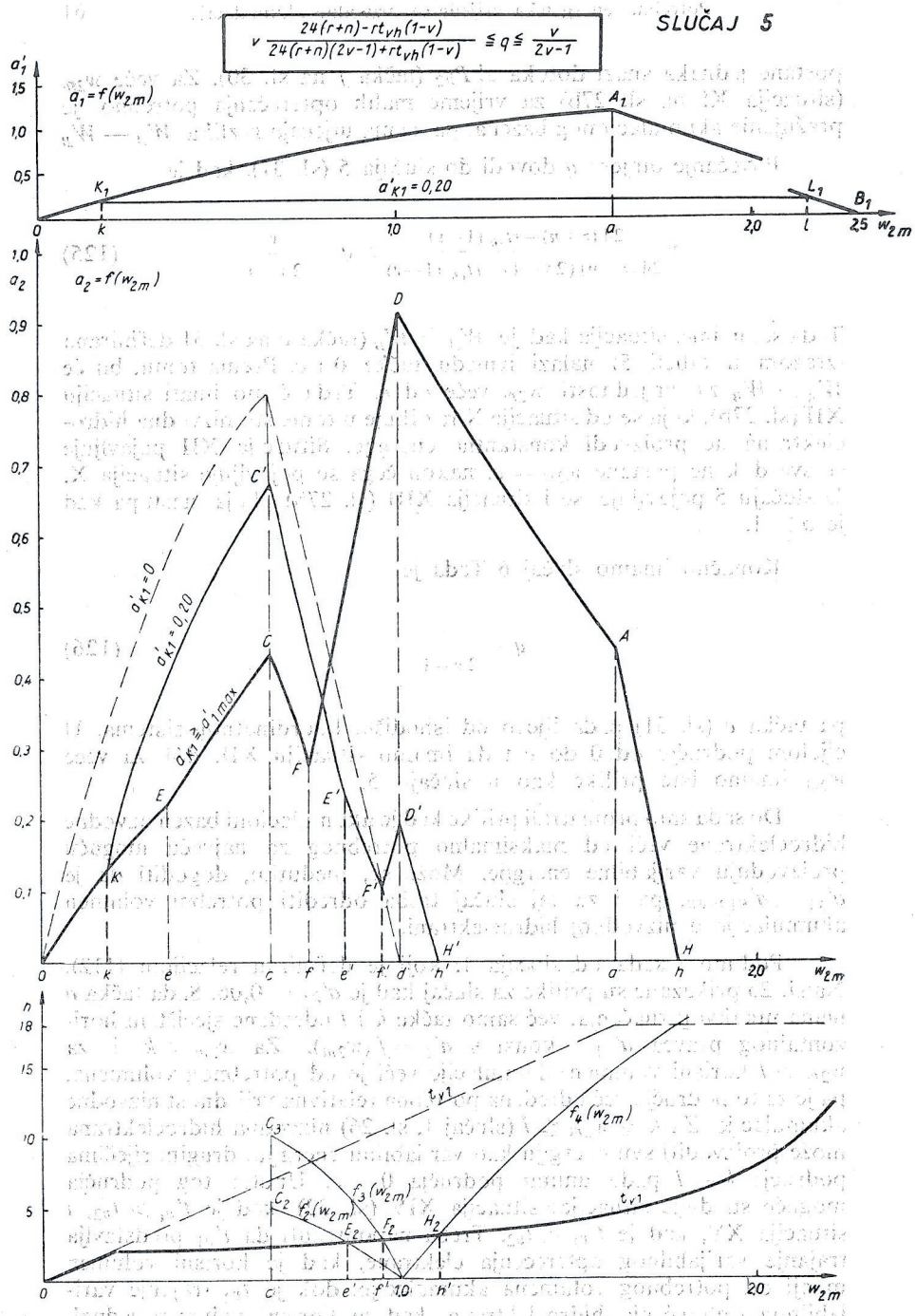
Konačno imamo slučaj 6 Tada je

$$q \geqq \frac{v}{2v-1} \tag{126}$$

pa tačka e (sl. 31) pada lijevo od ishodišta koordinatnog sistema. U cijelom području od 0 do c tada imamo situaciju XII, dok za veće w_{2m} imamo iste prilike kao u slučaju 5.

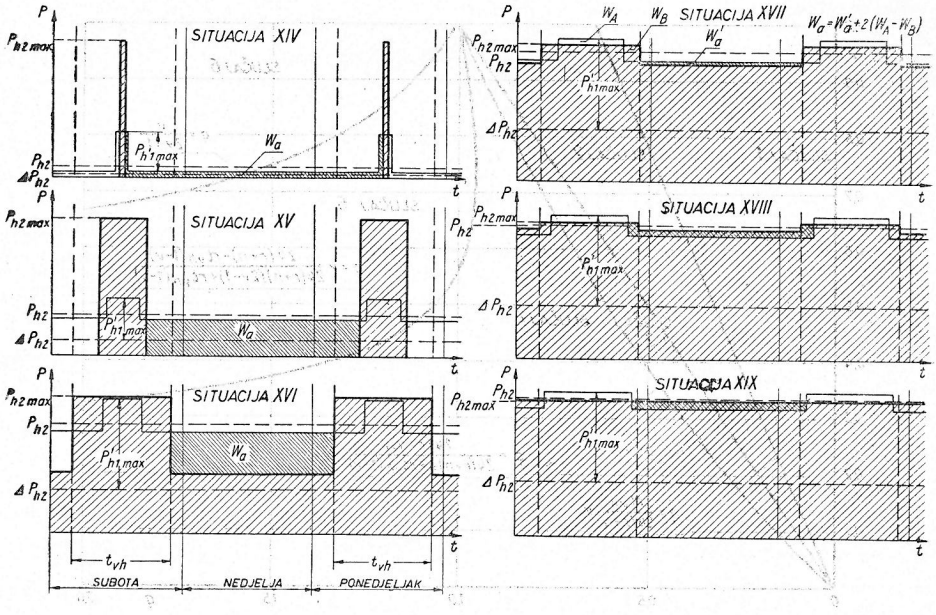
Do sada smo promatrali prilike kad je akumulacioni bazen uzvodne hidroelektrane veći od maksimalno potrebnog za najveću moguću proizvodnju varijabilne energije. Može se, međutim, dogoditi da je $a'_{k1} < a'_{k1\,\max}$, pa i za taj slučaj treba odrediti potrebni volumen akumulacije u nizvodnoj hidroelektrani.

Pođimo i sada od slučaja 1, koji je definiran relacijom (112). Na sl. 26 prikazane su prilike za slučaj kad je $a'_{k1} = 0{,}06$. Sada tačka a nema nikakvog značenja, već samo tačke k i l određene sjecištem horizontalnog pravca $a'_{k1} = \text{konst}$ s $a'_1 = f(w_{2m})$. Za $w_{2m} < k$ i za $w_{2m} > l$ korisni volumen akumulacije veći je od potrebnog volumena, pa je za to područje već određena potrebna relativna vrijednost nizvodne akumulacije. Za $k \leqq w_{2m} \leqq l$ (slučaj 1, sl. 26) nizvodna hidroelektrana može proizvoditi svu energiju kao varijabilnu energiju, drugim riječima područje $k - l$ pada unutar područja $0 - c$. Unutar tog područja moguće su dvije situacije: situacija XIV (sl. 32), kad je $t'_{v1} > t_{v2}$, i situacija XV, kad je $t'_{v1} < t_{v2}$. Treba napomenuti da t'_{v1} predstavlja trajanje varijabilnog opterećenja elektrane, kad je korisni volumen manji od potrebnog volumena akumulacije, dok je t_{v2} trajanje varijabilnog opterećenja hidroelektrane, kad je korisni volumen jednak ili veći od potrebnog volumena. Izjednačenjem t_{v2} (114) i t'_{v1}, koji



Sl. 31. Potrebna relativna energetska vrijednost akumulacija za uzvodnu i nizvodnu hidroelektranu u ovisnosti o relativnoj mogućoj proizvodnji nizvodne hidroelektrane za slučaj 5 (Primjer za $v = 0,60$ i $q = 1,50$).

dobivamo iz (91), koristeći relacije (108) i (109) (izraz za t'_{v1} naveden je u tabeli 1) dobivamo relativnu vrijednost akumulacije, koja je potrebna kad su jednaka vremena trajanja proizvodnje varijabilne energije u uzvodnoj i nizvodnoj hidroelektrani. Izraz koji daje tu vrijednost akumulacije označen je s $f_1(w_{2m})$, a naveden je u tabeli 1. Tok krivulje $f_1(w_{2m})$ prikazan je na sl. 26. Unošenjem u isti dijagram korisnog



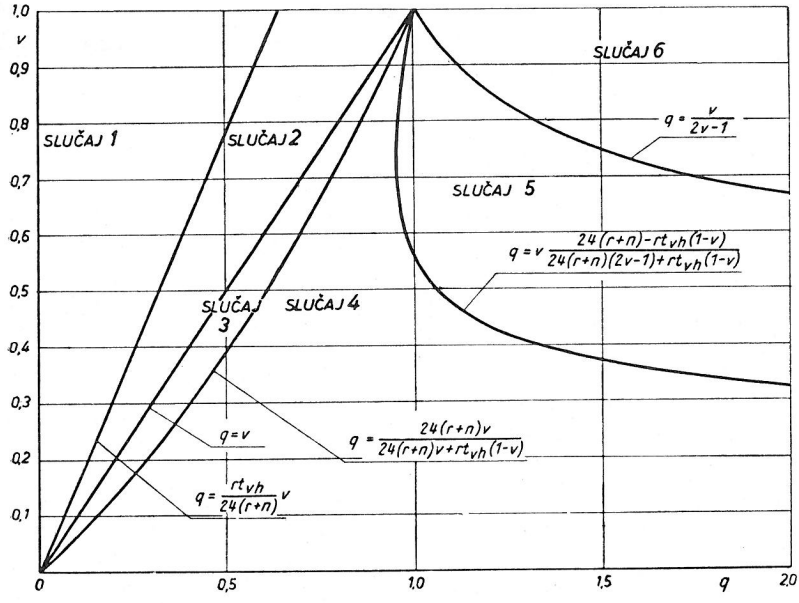
Sl. 32. Situacije rasporeda reguliranih protoka za određivanje potrebne relativne energetske vrijednosti nizvodne akumulacije uz pretpostavku da je relativna energetska vrijednost uzvodne akumulacije manja od maksimalno potrebne (situacije XIV—XIX).

volumena akumulacije dolazi se do tačaka E_2 i F_2, koje daju vrijednost za w_{2m}, kad je $t_{v2} = t'_{v1}$. Za područje $f_1(w_{2m}) > a'_{k1}$ bit će $t_{v2} > t'_{v1}$, a u područjima kad je $f_1(w_{2m}) < a'_{k1}$ bit će $t_{v2} < t'_{v1}$. Na taj način definirana su područja u kojima se pojavljuje situacija XIV i područje situacije XV, što omogućuje i određivanje toka krivulja $a_2 = f(w_{2m})$ prema izrazima navedenim u tabeli 1.

Za slučaj 2 (sl. 28) opet se pojavljuju situacije XIV i XV (sl. 32), pa se i granica između tih dviju situacija određuje pomoću $f_1(w_{2m})$ Treba, međutim, naglasiti da $f_1(w_{2m})$ ima značenje za područje kad je $t_{v2} < t_{vh}$, odnosno kad je $w_{2m} < c$. Osim toga, u slučaju 2 pojavljuje

se situacija XVI (sl. 32), kad nizvodna hidroelektrana pored varijabilne energije mora proizvoditi i konstantnu energiju. Situacija XVI pojavljuje se kad je $w_{2m} > c$.

U slučaju 3 ne pojavljuje se situacija XIV, jer je uvijek $a'_{k1} > f_1(w_{2m})$. Sada se, međutim, pored situacija XV i XVI pojavljuju situacije XVII, XVIII i XIX (sl. 32). Granica između situacija XVI i XVII određena je funkcijom $f_2(w_{2m})$, koja je navedena u tabeli 3,



Sl. 33. Granice slučajeva prikazanih na sl. 26, 28—31 i tab. 1—5.

a čiji je tok prikazan na sl. 29. Funkcija $f_2(w_{2m})$ prikazuje potrebno trajanje t'_{v1} kod kojega je ispunjen uvjet da je $W_A = W_B$. Sjecište te krivulje s krivuljom koja prikazuje ovisnost t'_{v1} o w_{2m}, daje tačku E_2, kojom je određena relativna proizvodnja w_{2m} kad je postignuta jednakost $W_A = W_B$. Razlika između W_A i W_B ima utjecaja na potrebnu energetsku vrijednost akumulacije sve dok je $P_{k2} < P'_{k1} + \Delta P_{h2}$. Jednakost P_{k2} i zbroja P'_{k1} i ΔP_{h2} određena je funkcijom $f_3(w_{2m})$, koja također daje vrijednost trajanja t'_{v1} kod koje se postiže spomenuta jednakost. Sjecište krivulje $f_3(w_{2m})$ s krivuljom t'_{v1} daje tačku F_2, koja prikazuje granicu između situacija XVII i XVIII. Najveća je relativna proizvodnja $w_{2m} = 1$, za koju se još pojavljuje situacija XVIII, a za $w_{2m} > 1$ imamo situaciju XIX. Na sl. 29 ucrtan je tok

funkcije $f_4(w_{2m})$, koji daje vrijednost t'_{v1} kod koje postaje $a_2 = 0$. U slučaju 3 ta funkcija nema utjecaja, jer je $h' > l$, odnosno jer krivulja $f_4(w_{2m})$ siječe krivulju t'_{v1} kad je $t'_{v1} = t_{vh}$.

Slučajevi 4 i 5 razlikuju se od slučaja 3 jedino u tome što funkcija $f_4(w_{2m})$ dolazi do izražaja, jer je $h' < l$, dok se slučaj 5 razlikuje od slučaja 4 što je moguće za relativno veće akumulacije a'_{k1} da se pojavi i situacija kad je $W_A > W_B$ i onda kad je $w_{2m} < c$. Tada se a_2 izračunava prema relaciji koja vrijedi za situaciju XVII (tabela 4) s tim da se mjesto t_{vh} postavi izraz za t_{v2} (114).

Primjeri na sl. 26—31 nacrtani su uz pretpostavku da je $v = 0{,}6$ dok su na sl. 33 prikazane granice opisanih slučajeva u ovisnosti o veličini v. Vidi se da se svi slučajevi od 1 do 6 mogu pojaviti za veće vrijednosti od v, dok se za vrijednosti manje od v pojavljuju samo prva četiri slučaja.

b) Maksimalno potrebni volumen akumulacije

Maksimalno potrebni volumen akumulacije pojavljuje se bilo kad relativna moguća proizvodnja w_{2mc} nizvodne hidroelektrane postigne vrijednost određenu relacijom (70), bilo kad relativna moguća proizvodnja bude $w_{2md} = 1$. Za prvi slučaj maksimalna relativna vrijednost akumulacije određuje se iz relacije

$$a_{2\max c} = \frac{rt_{vh}}{24} \frac{2\cdot 24 - t_{vh}}{24(r+n)} \cdot$$

$$\cdot \frac{24(r+n)\left(1 - \frac{t'_{v1c}}{t_{vh}} q\right) - rt'_{v1c}(1-v)}{24(r+n)\, t'_{v1c}} + \Delta a_2 \tag{127}$$

gdje je

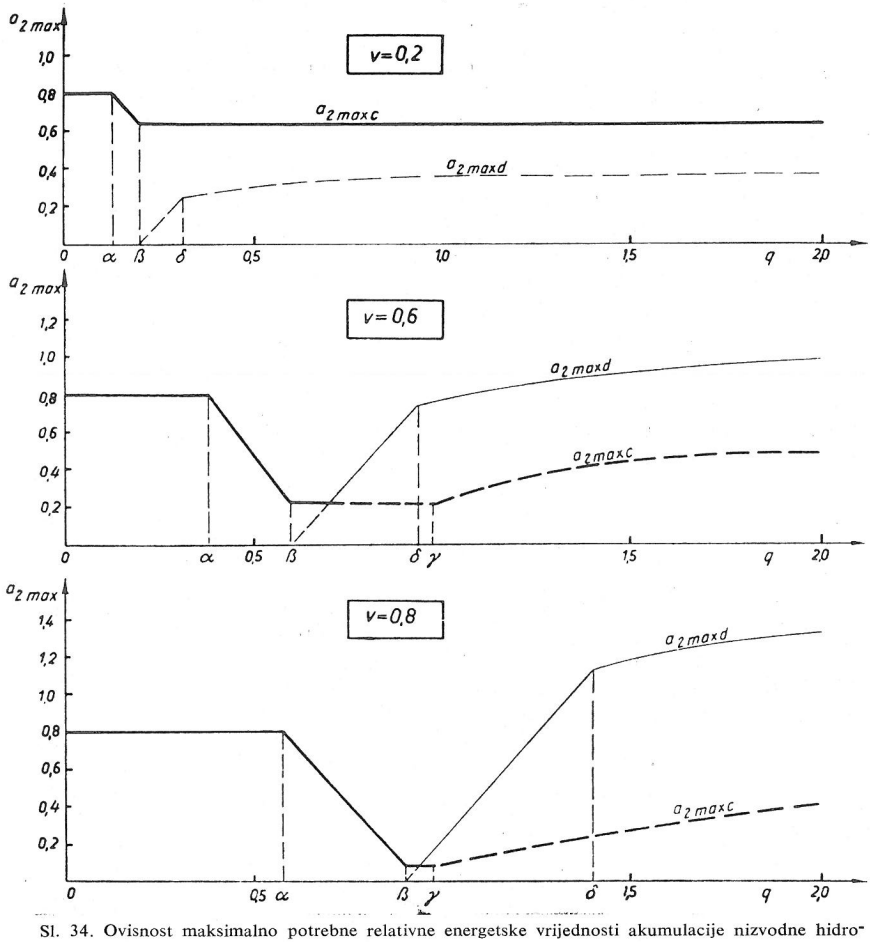
$$\Delta a_2 = 2\frac{t'_{v1c}}{24} \frac{24(r+n)\, q - rt_{vh} v}{24(r+n) - rt'_{v1c}} - \frac{t_{vh} + t'_{v1c}}{24} \cdot$$

$$\cdot \frac{24(r+n) - rt_{vh} + rt'_{v1c}\left[q - 1 + \frac{rt_{vh}}{24(r+n)}(1-v)\right]}{24(r+n) - rt'_{v1c}} \tag{127 a}$$

dok za drugi slučaj vrijedi relacija

$$a_{2\max d} = \frac{rt'_{v1d}}{24} \frac{2\cdot 24 - t'_{v1d}}{24(r+n) - rt'_{v1d}} (q - v) \tag{128}$$

U navedenim izrazima t'_{v1c} je trajanje varijabilnog opterećenja uzvodne hidroelektrane kod relativne moguće proizvodnje w_{2mc}, a



Sl. 34. Ovisnost maksimalno potrebne relativne energetske vrijednosti akumulacije nizvodne hidroelektrane o omjeru protoka (v) i o omjeru veličina izgradnje (q).

$$\alpha = v\frac{rt_{vh}}{24(r+n)}\ ;\quad \beta = v;\quad \gamma = v\frac{24(r+n)-rt_{vh}(1-v)}{24(r+n)(2v-1)+rt_{vh}(1-v)}\ ;\quad \delta = v\frac{24(r+n)}{rt_{vh}}$$

$$a_{2\max c} = f(q);\ 0 \leqq q \leqq \alpha : a_{2\max c} = \frac{rt_{vh}}{24}\ \frac{2\cdot 24 - t_{vh}}{24(r+n)}$$

$$\alpha \leqq q \leqq \beta : a_{2\max c} = \frac{rt_{vh}}{24}\ \frac{2\cdot 24 - t_{vh}}{24(r+n)}\ \frac{24(r+n)(1-q) - rt_{vh}(1-v)}{24(r+n) - rt_{vh}}$$

$$\beta \leqq q \leqq \gamma : a_{2\max c} = \frac{rt_{vh}}{24}\ \frac{2\cdot 24 - t_{vh}}{24(r+n)}\ (1-v)$$

$$\gamma \leqq q \leqq \infty : a_{2\max c} = \frac{rt_{vh}}{24}\ \frac{2\cdot 24 - t_{vh}}{24(r+n)}\ (1-v) + \frac{t_{vh}}{24}\left\{2v - \left(1+\frac{v}{q}\right)\left[1 - \frac{rt_{vh}}{24(r+n)}\ (1-v)\right]\right\}$$

$$a_{2\max d} = f(q);\ 0 \leqq q \leqq \beta : a_{2\max d} = 0$$

$$\beta \leqq q \leqq \delta : a_{2\max d} = \frac{rt_{vh}}{24}\ \frac{2\cdot 24 - t_{vh}}{24(r+n) - rt_{vh}}\ (q-v)$$

$$\delta \leqq q \leqq \infty : a_{2\max d} = v\left(2 - \frac{r+n}{r}\ \frac{v}{q}\right)$$

t'_{v1d} trajanje varijabilnog opterećenja uzvodne hidroelektrane kod relativne moguće proizvodnje w_{2md}. Ako je korisni volumen akumulacije manji od potrebnog, t'_{v1c} se određuje prema izrazu za t'_{v1} u tabelama 1—5, a za slučaj kad je korisni volumen akumulacije veći od potrebnog, treba za t'_{v1c} uvrstiti vrijednost koja odgovara vrijednosti t_{v1} za pojedini slučaj, a to može biti 0, t_{vh} ili vrijednost prema (120).

Do relacija (127) i (128) dolazi se kad se u izraz za a_2 za situaciju XVII, odnosno XIX uvrste odgovarajuće vrijednosti za w_{2m}. Veličina Δa_2 uzima u obzir povećanje potrebne vrijednosti akumulacije za slučaj kad je $W_A > W_B$. Veličinu Δa_2 treba uzeti u račun samo onda kad je $\Delta a_2 > 0$, dok u svim ostalim slučajevima treba postaviti $\Delta a_2 = 0$.

Navedene relacije vrijede za sve slučajeve, a mjerodavan je onaj izraz koji daje veću vrijednost.

Na sl. 34 prikazana je ovisnost $a_{2\,\max}$ o q kad je $a'_{k1} \geqq a'_{k1\,\max}$ za nekoliko vrijednosti od v. Osim toga — koristeći relacije (127), (127a) i (128) — navedeni su izrazi za $a_{2\,\max} = f(q)$. Iz podataka na sl. 34 možemo konstatirati da za velike vrijednosti v i za velike vrijednosti q dobivamo najveći potrebni volumen akumulacije. Tako iz posljednje relacije na sl. 34 dolazimo do najvećeg potrebnog volumena akumulacije. Ako postavimo da je $q = \infty$, dobit ćemo da je $a_{2\,\max\max} = 2\,v$, što predstavlja maksimalno mogući potrebni volumen. To znači da neće biti nikakvih poteškoća da se ostvari najveća moguća proizvodnja varijabilne energije, ako je vrijeme trajanja pražnjenja akumulacionog bazena nizvodne hidroelektrane jednako ili veće od $48v$ sati. Do tog trajanja dolazimo pomoću relacije (64) i relacije za $a_{2\,\max\max}$.

c) Određivanje količine varijabilne i konstantne energije

Količinu varijabilne odnosno konstantne energije u uzvodnoj hidroelektrani određujemo na način opisan u poglavlju II 3b. To isto vrijedi i za nizvodnu hidroelektranu, ako je korisna vrijednost akumulacije jednaka ili veća od maksimalno potrebne. Pri tome ne treba da nas zbuni oblik krivulje $a_2 = f(w_{2m})$ za velike vrijednosti w_{2m}, jer je tolika akumulacija potrebna baš radi ostvarenja najpovoljnijeg dijagrama opterećenja ($w_{2m} < 1$), odnosno za što potpunije iskorištenje vode ($w_{2m} > 1$). To znači da se za slučaj prikazan relacijom (77) relativna količina varijabilne energije određuje prema (75), a za slučaj prikazan relacijom (81) prema (80).

Isto možemo reći i za slučajeve kad je $a_{k2} < a_{2\,\max}$. Tada relativnu količinu varijabilne energije određujemo prema relaciji (89), uz napomenu da mjesto veličine t'_{vh} treba uvrstiti vrijednost t'_{v2}, koja prikazuje trajanje varijabilnog opterećenja nizvodne hidroelektrane kad je $a_{k2} < a_{2\,\max}$. Međutim, veličina t'_{v2} ne može se odrediti prema relaciji (91), jer treba uzeti u račun i utjecaj uzvodne akumulacije, pa je potrebno provesti detaljnije razmatranje da bi se odredila veličina t'_{v2}.

Tab. 6. Formule za određivanje trajanja varijabilnog opterećenja za uzvodnu i nizvodnu hidroelektranu za slučaj 1 (uz sl. 35).

$$\boxed{0 \leqq q \leqq \frac{r\,t_{vh}}{24\,(r+n)}\,v}$$

$$0 - A'_2:\ t_{v1} = 24\,\frac{r+n}{r}\,\frac{v}{q}\,w_{2m}\ \text{za}\ a'_{k1} \geqq a'_{1\max}$$

$$0 - C'_2:\ t_{v2} = 24\,\frac{r+n}{r}\,w_{2m}\ \text{za}\ a_{k2} \geqq a_{2\max}$$

$$\boxed{a'_{k1} \geqq a'_{1\max}}$$

Situacija I; $\quad O - S''_2:\ t_{v2} = 24\,\frac{r+n}{r}\,w_{2m}$

Situacija XX; $\quad S''_2 - A_2:\ t'_{v2} = 12\left\{2 + \frac{a_{k2} + \left(2 - \frac{r+n}{r}\right)q}{1 - q - w_{2m}\,(1-v)} - \right.$

$$\left. - \sqrt{\left[2 + \frac{a_{k2} + \left(2 - \frac{r+n}{r}\right)q}{1 - q - w_{2m}\,(1-v)}\right]^2 - 4\,\frac{r+n}{r}\,\frac{a_{k2} + \left(2 - \frac{r+n}{r}\right)w_{2m}\,v}{1 - q - w_{2m}\,(1-v)}}\right\}$$

Situacija XXI; $\quad A_2 - B_2:\ t'_{v2} = 12\left\{2 + \frac{a_{k2} + (q - w_{2m}\,v)\left(2 - \frac{r+n}{r}\right)\frac{24\,(r+n)}{24\,(r+n) - r\,t_{vh}}}{1 - q - w_{2m}\,(1-v)} - \right.$

$$\left. - \sqrt{\left[2 + \frac{a_{k2} + (q - w_{2m}\,v)\left(2 - \frac{r+n}{r}\right)\frac{24\,(r+n)}{24\,(r+n) - r\,t_{vh}}}{1 - q - w_{2m}\,(1-v)}\right]^2 - 4\,\frac{r+n}{r}\,\frac{a_{k2} + (q - w_{2m}\,v)\left(2 - \frac{r+n}{r}\right)\frac{r\,t_{vh}}{24\,(r+n) - r\,t_{vh}}}{1 - q - w_{2m}\,(1-v)}}\right\}$$

Situacija sl. 22; $\quad B_2 - T_2:\ t'_{v2} = 12\left[2 + \frac{a_{k2}}{1 - w_{2m}} - \sqrt{\left(2 + \frac{a_{k2}}{1 - w_{2m}}\right)^2 - 4\,\frac{r+n}{r}\,\frac{a_{k2}}{1 - w_{2m}}}\right]$

$\boxed{a'_{k1} < a'_{1\max}}$

$$m \text{ za } t'_{v1} = t'_{v2}$$

$$O - K_3:\ t_{v1} = 24\,\frac{r+n}{r}\,\frac{v}{q}\,w_{2m}$$

Situacija sl. 22; $$K_3 - L'_3:\ t'_{v1} = 12\left[2 + \frac{a'_{k1}}{q - w_{2m}v} - \sqrt{\left(2 + \frac{a'_{k1}}{q - w_{2m}v}\right)^2 - 4\,\frac{r+n}{r}\,\frac{a'_{k1}}{q - w_{2m}v}}\right]$$

$$O - S'_3:\quad t_{v2} = 24\,\frac{r+n}{r}\,w_{2m}$$

Situacija XXVIII; $$S'_3 - M:\ t'_{v2} = 12\left\{2 + \frac{a_{k2}\,[24\,(r+n) - r\,t'_{v1}] + \frac{r+n}{r}\,r\,t'_{v1}\,(q - w_{2m}v)}{24\,(r+n)\,(1 - w_{2m}) - r\,t'_{v1}\,[1 - q - w_2\,(1 - v)]} - \right.$$

$$\left. - \sqrt{\left[2 + \frac{a_{k2}\,[24\,(r+n) - r\,t'_{v1}] + \frac{r+n}{r}\,r\,t'_{v1}\,(q - w_{2m}v)}{24\,(r+n)\,(1 - w_{2m}) - r\,t'_{v1}\,[1 - q - w_{2m}\,(1 - v)]}\right]^2 - 4\,\frac{r+n}{r}\,\frac{a_{k2}\,[24\,(r+n) - r\,t'_{v1}] + 2\,r\,t'_{v1}\,(q - w_{2m}v)}{24\,(r+n)\,(1 - w_{2m}) - r\,t'_{v1}\,[1 - q - w_{2m}\,(1 - v)]}}\right\}$$

Situacija XXVII; $$M - L_3:\ t'_{v2} = 12\left\{2 + \frac{a_{k2} + (q - w_{2m}v)\left(2 - \frac{r+n}{r}\right)\frac{24\,(r+n)}{24\,(r+n) - rt'_{v1}}}{1 - q - w_{2m}\,(1 - v)} - \right.$$

$$\left. - \sqrt{\left[2 + \frac{a_{k2} + (q - w_{2m}v)\left(2 - \frac{r+n}{r}\right)\frac{24\,(r+n)}{24\,(r+) - rt'_{v1}}}{1 - q - w_{2m}\,(1 - v)}\right]^2 - 4\,\frac{r+n}{r}\,\frac{a_{k2} + (q - w_{2m}v)\left(2 - \frac{r+n}{r}\right)\frac{rt'_{v1}}{24\,(r+n) - rt'_{v1}}}{1 - q - w_{2m}\,(1 - v)}}\right\}$$

Situacija XXI; $$L_3 - B_3:\ t'_{v2} = 12\left\{2 + \frac{a_{k2} + (q - w_{2m}v)\left(2 - \frac{r+n}{r}\right)\frac{24\,(r+n)}{24\,(r+n) - rt_{vh}}}{1 - q - w_{2m}\,(1 - v)} - \right.$$

$$\left. - \sqrt{\left[2 + \frac{a_{k2} + (q - w_{2m}v)\left(2 - \frac{r+n}{r}\right)\frac{24\,(r+n)}{24\,(r+n) - rt_{vh}}}{1 - q - w_{2m}\,(1 - v)}\right]^2 - 4\,\frac{r+n}{r}\,\frac{a_{k2} + (q - w_{2m}v)\left(2 - \frac{r+n}{r}\right)\frac{rt_{vh}}{24\,(r+n) - rt_{vh}}}{1 - q - w_{2m}\,(1 - v)}}\right\}$$

Situacija sl. 22; $$B_3 - T_3:\ t'_{v2} = 12\left[2 + \frac{a_{k2}}{1 - w_{2m}} - \sqrt{\left(2 + \frac{a_{k2}}{1 - w_{2m}}\right)^2 - 4\,\frac{r+n}{r}\,\frac{a_{k2}}{1 - w_{2m}}}\right]$$

Tab. 7. Formule za određivanje trajanja varijabilnog opterećenja za uzvodnu i nizvodnu hidroelektranu za slučaj 2 (uz sl. 37).

$$\boxed{\frac{r\,t_{vh}}{24\,(r+n)}\,v \leqq q \leqq v}$$

O — A'_2 i O — C'_2 kao slučaj 1.

$$\boxed{a'_{k1} \geqq a'_{1\max}}$$

Situacija I; $O - S''_2$: $t_{v2} = 24\,\frac{r+n}{r}\,w_{2m}$

Situacija XX; $S''_2 - A_2$:

$$t'_{v2} = 12\left\{2 + \frac{a_{k2} + \left(2 - \frac{r+n}{r}\right)q}{1 - q - w_{2m}\,(1 - v)} - \sqrt{\left[2 + \frac{a_{k2} + \left(2 - \frac{r+n}{r}\right)q}{1 - q - w_{2m}\,(1 - v)}\right]^2 - 4\,\frac{r+n}{r}\,\frac{a_{k2} + \left(2 - \frac{r+n}{r}\right)w_{2m}\,v}{1 - q - w_{2m}\,(1 - v)}}\right\}$$

Situacija XXI; $A_2 - B_2$:

$$t'_{v2} = 12\left\{2 + \frac{a_{k2} + (q - w_{2m}\,v)\left(2 - \frac{r+n}{r}\right)\frac{24\,(r+n)}{24\,(r+n) - r\,t_{vh}}}{1 - q - w_{2m}\,(1 - v)} - \sqrt{\left[2 + \frac{a_{k2} + (q - w_{2m}\,v)\left(2 - \frac{r+n}{r}\right)\frac{24\,(r+n)}{24\,(r+n) - r\,t_{vh}}}{1 - q - w_{2m}\,(1 - v)}\right]^2 - 4\,\frac{r+n}{r}\,\frac{a_{k2} + (q - w_{2m}\,v)\left(2 - \frac{r+n}{r}\right)\frac{r\,t_{vh}}{24\,(r+n) - r\,t_{vh}}}{1 - q - w_{2m}\,(1 - v)}}\right\}$$

Situacija sl. 22; $B_2 - T_2$:

$$t'_{v2} = 12\left[2 + \frac{a_{k2}}{1 - w_{2m}} - \sqrt{\left(2 + \frac{a_{k2}}{1 - w_{2m}}\right)^2 - 4\,\frac{r+n}{r}\,\frac{a_{k2}}{1 - w_{2m}}}\right]$$

$$\boxed{a'_{k1} < a'_{1\max}}$$

$$m \quad \text{za } t'_{v1} = t'_{v2}$$

$$O - K_3: \quad t_{v1} = 24\,\frac{r+n}{r}\,\frac{v}{q}\,w_{2m}$$

Situacija sl. 22; $$K_3 - L'_3: \quad t'_{v1} = 12\left[2 + \frac{a'_{k1}}{q - w_{2m}\,v} - \sqrt{\left(2 + \frac{a'_{k1}}{q - w_{2m}\,v}\right)^2 - 4\,\frac{r+n}{r}\,\frac{a'_{k1}}{q - w_{2m}\,v}}\right]$$

$$O - S'_3: \quad t_{v2} = 24\,\frac{r+n}{r}\,w_{2m}$$

Situacija XXVIII; $$S'_3 - M: \quad t'_{v2} = 12\left\{2 + \frac{a_k\,[24\,(r+n) - r\,t'_{v1}] + \frac{r+n}{r}\,r\,t'_{v1}\,(q - w_{2m}\,v)}{24\,(r+n)\,(1 - w_{2m}) - r\,t'_{v1}\,[1 - q - w_2\,(1 - v)]} - \right.$$

$$\left. - \sqrt{\left[2 + \frac{a_{k2}\,[24\,(r+n) - r\,t'_{v1}] + \frac{r+n}{r}\,r\,t'_{v1}\,(q - w_{2m}\,v)}{24\,(r+n)\,(1 - w_{2m}) - r\,t'_{v1}\,[1 - q - w_{2m}\,(1 - v)]}\right]^2 - 4\,\frac{r+n}{r}\,\frac{a_{k2}\,[24\,(r+n) - r\,t'_{v1}] + 2\,r\,t'_{v1}\,(q - w_{2m}\,v)}{24\,(r+n)\,(1 - w_{2m}) - r\,t'_{v1}\,[1 - q - w_{2m}\,(1 - v)]}}\right\}$$

Situacija XXVII; $$M - L_3: \quad t'_{v2} = 12\left\{2 + \frac{a_{k2} + (q - w_{2m}\,v)\left(2 - \frac{r+n}{r}\right)\frac{24\,(r+n)}{24\,(r+n) - r\,t'_{v1}}}{1 - q - w_{2m}\,(1 - v)} - \right.$$

$$\left. - \sqrt{\left[2 + \frac{a_{k2} + (q - w_{2m}\,v)\left(2 - \frac{r+n}{r}\right)\frac{24\,(r+n)}{24\,(r+n) - r\,t'_{v1}}}{1 - q - w_{2m}\,(1 - v)}\right]^2 - 4\,\frac{r+n}{r}\,\frac{a_{k2} + (q - w_{2m}\,v)\left(2 - \frac{r+n}{r}\right)\frac{r\,t'_{v1}}{24\,(r+n) - r\,t'_{v1}}}{1 - q - w_{2m}\,(1 - v)}}\right\}$$

Situacija XXI; $$L_3 - B_3: \quad t'_{v2} = 12\left\{2 + \frac{a_{k2} + (q - w_{2m}\,v)\left(2 - \frac{r+n}{r}\right)\frac{24\,(r+n)}{24\,(r+n) - r\,t_{vh}}}{1 - q - w_{2m}\,(1 - v)} - \right.$$

$$\left. - \sqrt{\left[2 + \frac{a_{k2} + (q - w_{2m}\,v)\left(2 - \frac{r+n}{r}\right)\frac{24\,(r+n)}{24\,(r+n) - r\,t_{vh}}}{1 - q - w_{2m}\,(1 - v)}\right]^2 - 4\,\frac{r+n}{r}\,\frac{a_{k2} + (q - w_{2m}\,v)\left(2 - \frac{r+n}{r}\right)\frac{r\,t_{vh}}{24\,(r+n) - r\,t_{vh}}}{1 - q - w_{2m}\,(1 - v)}}\right\}$$

Situacija sl. 22; $$B_3 - T_3: \quad t'_{v2} = 12\left[2 + \frac{a_{k2}}{1 - w_{2m}} - \sqrt{\left(2 + \frac{a_{k2}}{1 - w_{2m}}\right)^2 - 4\,\frac{r+n}{r}\,\frac{a_{k2}}{1 - w_{2m}}}\right]$$

Tab. 8. Formule za određivanje trajanja varijabilnog opterećenja za uzvodnu i nizvodnu hidroelektranu za slučaj 3 (uz sl. 38).

$$\boxed{v \leqq q \leqq \frac{24\,(r+n)\,v}{24\,(r+n)\,v - r t_{vh}\,(1-v)}}$$

$O - A'_2$ i $O - C'_2$ kao slučaj 1.

$$\boxed{a'_{k1} \geqq a'_{1\max}}$$

m' i m'' für $t'_{v2} = t_{v1}$

Situacija VI; $O - S''_2$: $t_{v2} = 24\,\frac{r+n}{r}\,w_{2m}$

Situacija XXII; $S''_2 - M'_2$:

$$t'_{v2} = 12\left\{2 + \frac{a_{k2} + \frac{r+n}{r}\,w_{2m}\,v}{1 - w_{2m}\,(1-v)} - \sqrt{\left[2 + \frac{a_{k2} + \frac{r+n}{r}\,w_{2m}\,v}{1 - w_{2m}\,(1-v)}\right]^2 - 4\,\frac{r+n}{r}\,\frac{a_{k2} + 2\,w_{2m}\,v}{1 - w_{2m}\,(1-v)}}\right\}$$

Situacija XX; $M'_2 - M''_2$:

$$t'_{v2} = 12\left\{2 + \frac{a_{k2} + \left(2 - \frac{r+n}{r}\right) q}{1 - q - w_{2m}\,(1-v)} - \sqrt{\left[2 + \frac{a_{k2} + \left(2 - \frac{r+n}{r}\right) q}{1 - q - w_{2m}\,(1-v)}\right]^2 - 4\,\frac{r+n}{r}\,\frac{a_{k2} + \left(2 - \frac{r+n}{r}\right) w_{2m}\,v}{1 - q - w_{2m}\,(1-v)}}\right\}$$

Situacija XXII; $M''_2 - T''_2$: t'_{v2} wie $S''_2 - M'_2$

$$\boxed{a'_{k1} < a'_{1\max}}$$

$O - K_3$: $t_{v1} = 24\,\frac{r+n}{r}\,\frac{v}{q}\,w_{2m}$

Situacija sl. 22; $K_3 - L'_3$:

$$t'_{v1} = 12\left[2 + \frac{a'_{k1}}{q - w_{2m}\,v} - \sqrt{\left(2 + \frac{a'_{k1}}{q - w_{2m}\,v}\right)^2 - 4\,\frac{r+n}{r}\,\frac{a'_{k1}}{q - w_{2m}\,v}}\right]$$

$O - S'_3$: $t_{v2} = 24\,\frac{r+n}{r}\,w_{2m}$

Situacija XXVIII; $S'_3 - T'_3$: $t'_{v2} = 12 \left\{ 2 + \frac{a_{k2}[24(r+n) - r\,t'_{v1}] + \frac{r+n}{r} r t'_{v1}(q - w_{2m} v)}{24(r+n)(1 - w_{2m}) - r t'_{v1}[1 - q - w_{2m}(1 - v)]} - \sqrt{\left[2 + \frac{a_{k2}[24(r+n) - r\,t'_{v1}] + \frac{r+n}{r} r t'_{v1}(q - w_{2m} v)}{24(r+n)(1 - w_{2m}) - r t'_{v1}[1 - q - w_{2m}(1 - v)]}\right]^2 - 4\frac{r+n}{r} \frac{a_{k2}[24(r+n) - r t'_{v1}] + 2 r t'_{v1}(q - w_{2m} v)}{24(r+n)(1 - w_{2m}) - r t'_{v1}[1 - q - w_{2m}(1 - v)]}} \right\}$

Pođimo najprije od pretpostavke da je korisni volumen akumulacije uzvodne hidroelektrane veći ili jednak maksimalno potrebnom volumenu ($a'_{k1} \geqq a'_{1\,\max}$), te promotrimo prilike za pet već razmatranih slučajeva (poglavlje II 4b).

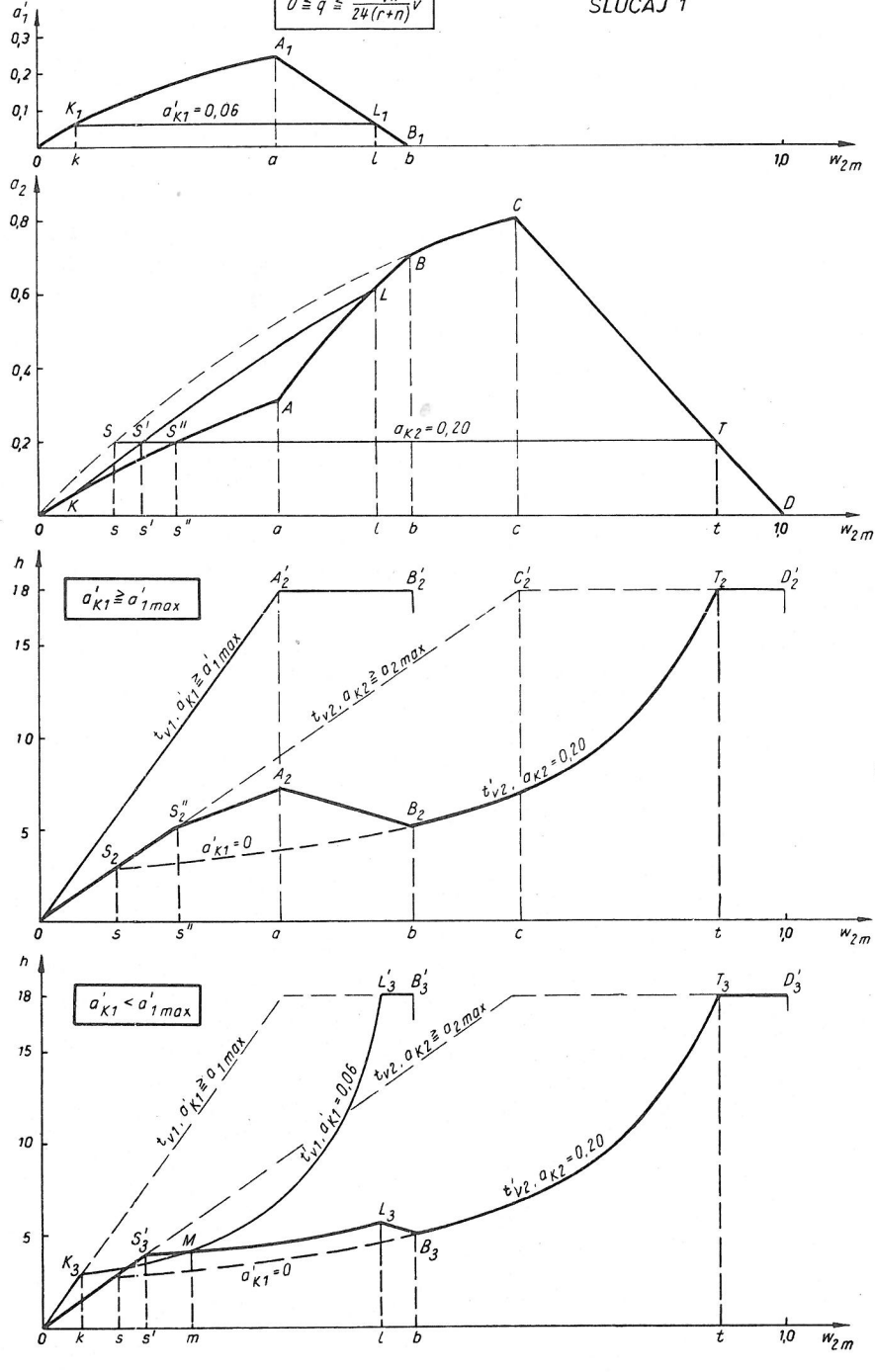
Za slučaj 1 prilike su prikazane na sl. 35 i tabeli 6. Za male vrijednosti w_{2m} ($0 < w_{2m} < s''$) korisna akumulacija nizvodne hidroelektrane je veća od potrebne akumulacije, pa se t_{v2} određuje prema (114). Za veći w_{2m} ($s'' < w_{2m} < a$) imamo $t'_{v2} < t_{v1}$, pa nastupa situacija XX, za koju t'_{v2} možemo odrediti prema formuli navedenoj u tabeli 6. Daljim povećanjem w_{2m} postaje $t_{v1} = t_{vh}$, pa nastupa situacija XXI, koja se pojavljuje sve dok ne postane $w_{2m} = b$, kad za uzvodnu hidroelektranu ima toliko vode da može konstantno raditi s punim opterećenjem. Za nizvodnu hidroelektranu tada nastupa stanje kao da nema uzvodne hidroelektrane, pa je za određivanje t'_{v2} mjerodavna relacija (91) sve dok ne postane $w_{2m} = t$, jer za $w_{2m} > t$ vrijedi $a_{k2} > a_2$.

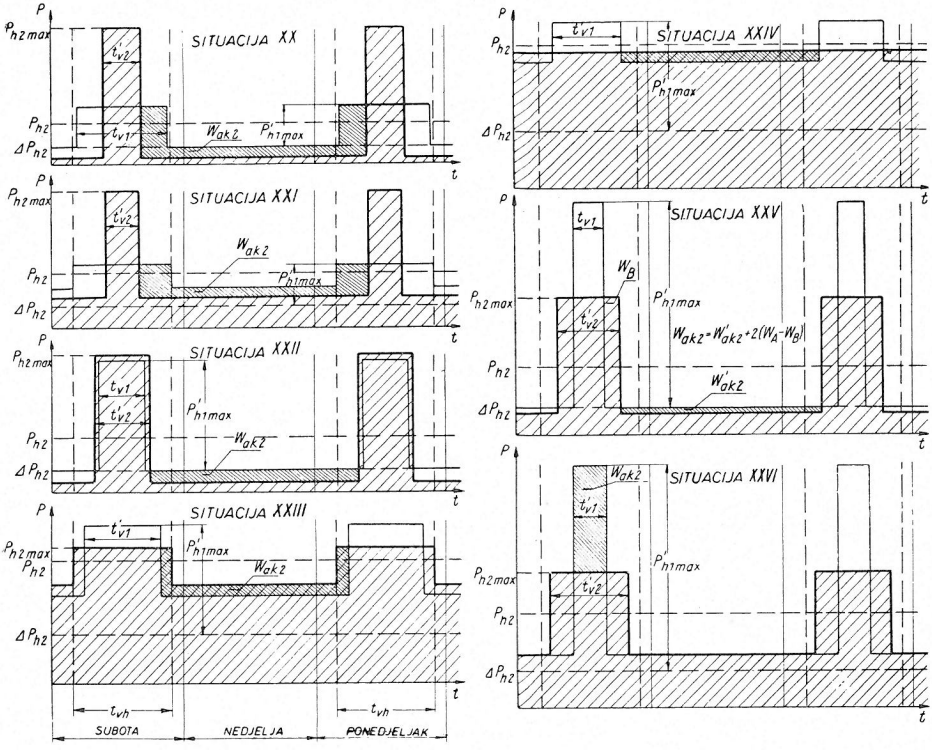
Za slučaj 2 (sl. 37 i tabela 7) imamo iste prilike kao u slučaju 1, dok se za slučaj 3 (sl. 38 i tabela 8) pojavljuje i situacija XXII, kod koje je $t'_{v2} > t_{v1}$. Tu situaciju imamo za $s'' < w_{2m} < m'$ i $m'' < w_{2m} < t''$. Točke M'_2 i M''_2 određujemo iz presjecišta krivulje $t'_{v2} = f(w_{2m})$ i pravca $t_{v1} = f(w_{2m})$. U slučaju 3 za male vrijednosti a_{k2} (kad je $a_{k2} < a_2$ za $w_{2m} = 1$) mogu se pojaviti i situacije XXIII i XXIV o kojima će biti govora u slučaju 4.

U slučaju 4 (sl. 39 i tabela 9) imamo za promatrani slučaj $t'_{v2} > t_{v1}$, pa to odgovara situaciji XXII (sl. 36). Za manje a_{k2} može doći i do situacije XX. Ovdje se, međutim, za veće w_{2m} pojavljuje situacija XXIII (sl. 36) kod koje se u razdoblju malih opterećenja mora

$0 \leqq q \leqq \frac{r t_{vh}}{24(r+n)} v$

SLUČAJ 1





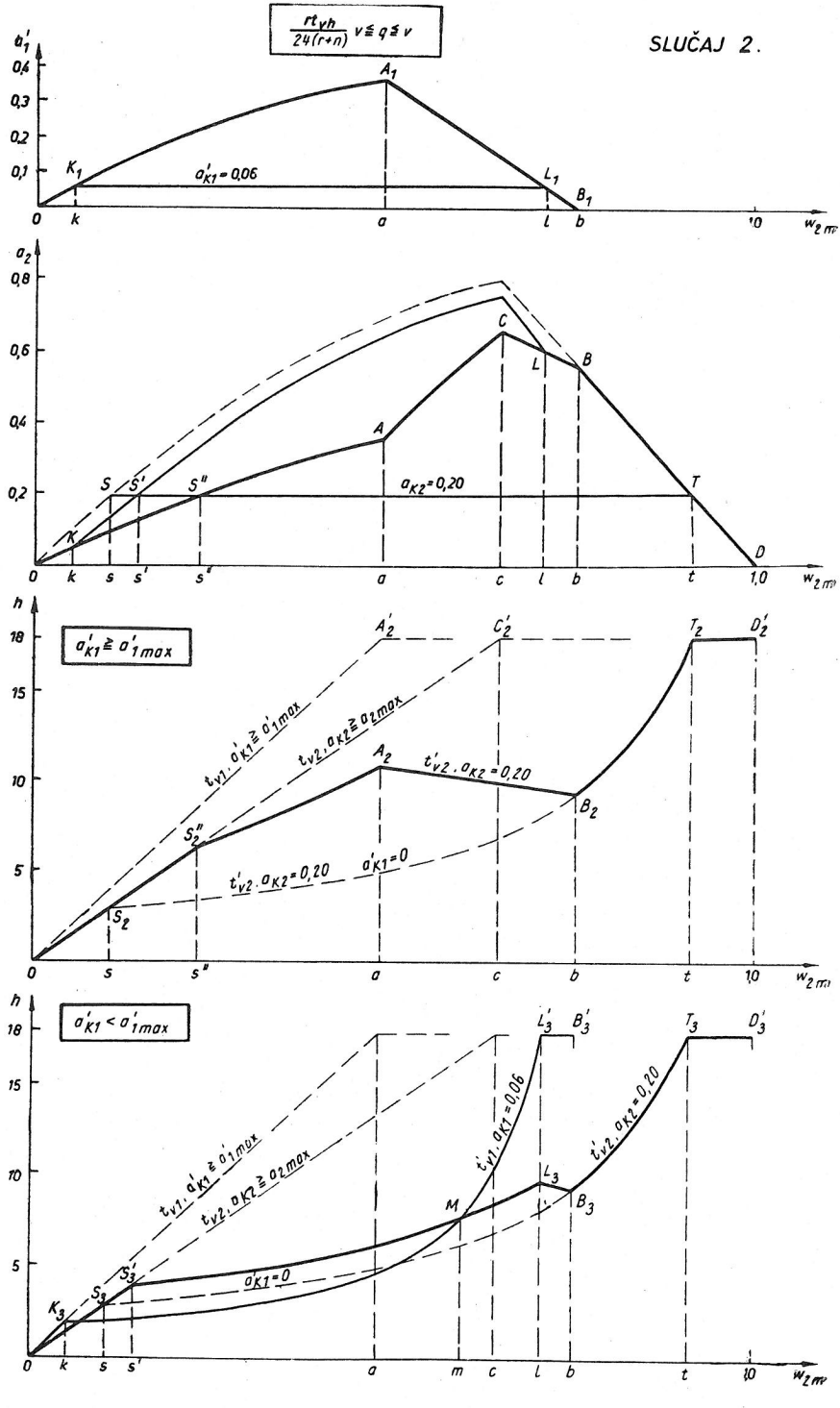
Sl. 36. Situacija rasporeda reguliranih protoka za određivanje trajanja varijabilnog opterećenja nizvodne hidroelektrane uz pretpostavku da je relativna energetska vrijednost uzvodne akumulacije veća od maksimalno potrebne (situacija XX—XXVI).

Sl. 35. Trajanja varijabilnog opterećenja za uzvodnu i nizvodnu hidroelektranu u ovisnosti o relativnoj mogućoj proizvodnji nizvodne hidroelektrane za slučaj 1 (Primjer $v = 0{,}60$ i $q = 0{,}30$).

Sl. 37. Trajanja varijabilnog opterećenja za uzvodnu i nizvodnu hidroelektranu u ovisnosti o relativnoj mogućoj proizvodnji nizvodne hidroelektrane za slučaj 2 (Primjer za $v = 0{,}60$ i $q = 0{,}45$).

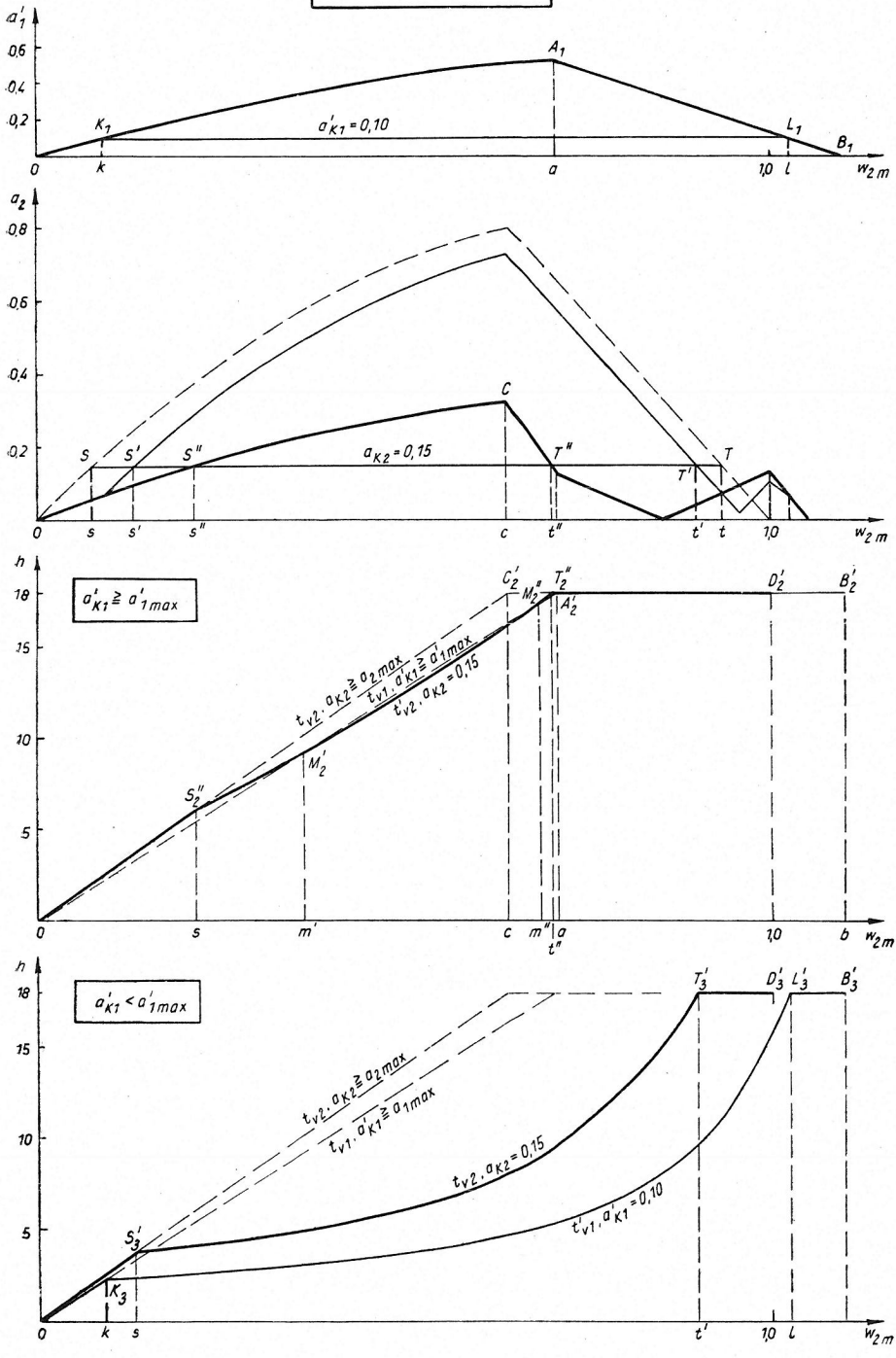
Sl. 38. Trajanja varijabilnog opterećenja za uzvodnu i nizvodnu hidroelektranu u ovisnosti o relativnoj mogućoj proizvodnji nizvodne hidroelektrane za slučaj 3 (Primjer za $v = 0{,}60$ i $q = 0{,}66$)

SLUČAJ 2.


$\frac{rt_{vh}}{24(r+n)}\ v \leq q \leq v$
a'_1
A_1
K_1
L_1
B_1
$a'_{K1} = 0,06$
a_2
C
L
B
A
S
S'
S''
K
T
D
$a_{K2} = 0,20$
h
$a'_{K1} \geq a'_{1max}$
A'_2
C'_2
T_2
D'_2
$t_{v1}, a'_{K1} \geq a'_{1max}$
$t_{v2}, a_{K2} \geq a_{2max}$
A_2
$t'_{v2}, a_{K2} = 0,20$
B_2
S''_2
$t'_{v2}, a_{K2} = 0,20$
$a'_{K1} = 0$
S_2
$a'_{K1} < a'_{1max}$
L'_3
B'_3
T_3
D'_3
$t_{v1}, a'_{K1} \geq a'_{1max}$
$t_{v2}, a_{K2} \geq a_{2max}$
$t'_{v1}, a'_{K1} = 0,06$
$t'_{v2}, a_{K2} = 0,20$
L_3
B_3
M
$a'_{K1} = 0$
S'_3
S_3
K_3
w_{2m}

$$v \leqq q \leqq \frac{24(r+n)v}{24(r+n)v + r_1 t_{vh}(1-v)}$$

SLUČAJ 3



Tab. 9. Formule za određivanje trajanja varijabilnog opterećenja za uzvodnu i nizvodnu hidroelektranu za slučaj 4 (uz sl. 39).

$$\frac{24\,(r+n)\,v}{24\,(r+n)\,v + r\,t_{vh}\,(1-v)} \leqq q \leqq v\,\frac{24\,(r+n) - r\,t_{vh}\,(1-v)}{24\,(r+n)\,(2\,v-1) + r\,t_{vh}\,(1-v)}$$

$O - A'_2$ i $O - C'_2$ kao slučaj 1.

$a'_{k1} \geqq a'_{1\max}$

Situacija VI; $O - S''_2$: $t_{v2} = 24\,\frac{r+n}{r}\,w_{2m}$

Situacija XXII; $S''_2 - T''_2$: $t'_{v2} = 12\left\{2 + \frac{a_{k2} + \frac{r+n}{r}\,w_{2m}\,v}{1 - w_{2m}\,(1-v)} - \right.$

$$\left. - \sqrt{\left[2 + \frac{a_{k2} + \frac{r+n}{r}\,w_{2m}\,v}{1 - w_{2m}\,(1-v)}\right]^2 - 4\,\frac{r+n}{r}\,\frac{a_{k2} + 2\,w_{2m}\,v}{1 - w_{2m}\,(1-v)}}\right\}$$

$O - X_2$: $t_{v1} = 24\,\frac{r+n}{r}\,\frac{v}{q}\,w_{2m}$

Situacija XXIII; $X_2 - D_2$: $$t'_{v1} = 12\left\{2 + \frac{a_{k2} - \frac{r+n}{r}(1 - w_{2m}) + \left(2 - \frac{t_{vh}}{24}\right)\frac{24(r+n)(1 - w_{2m})}{24(r+n) - rt_{vh}}}{q - 1 + w_{2m}(1 - v)} - \right.$$

$$\left. - \sqrt{\left[2 + \frac{a_{k2} - \frac{r+n}{r}(1 - w_{2m}) + \left(2 - \frac{t_{vh}}{24}\right)\frac{24(r+n)(1-w_{2m})}{24(r+n) - rt_{vh}}}{q - 1 + w_{2m}(1 - v)}\right]^2 - 4\frac{r+n}{r}\frac{a_{k2} - 2(1 - w_{2m}) + 2\left(2 - \frac{t_{vh}}{24}\right)\frac{24(r+n)(1-w_{2m}}{24(r+n) - rt_{vh}}}{q - 1 + w_{2m}(1 - v)}}\right\}$$

Situacija XXIV; $D_2 - Y_2$: $$t'_{v1} = 12\left\{2 + \frac{a_{k2} - \frac{r+n}{r}(1 - w_{2m})}{q - 1 + w_{2m}(1 - v)} - \right.$$

$$\left. - \sqrt{\left[2 + \frac{a_{k2} - \frac{r+n}{r}(1 - w_{2m})}{q - 1 + w_{2m}(1 - v)}\right]^2 - 4\frac{r+n}{r}\frac{a_{k2} - 2(1 - w_{2m})}{q - 1 + w_{2m}(1 - v)}}\right\}$$

$$\boxed{a'_{k1} < a'_{1\max}}$$

$$O - K_3: \quad t_{v1} = 24\frac{r+n}{r}\frac{v}{q}w_{2m}$$

Situacija sl. 22; $K_3 - L'_3$: $$t'_{v1} = 12\left[2 + \frac{a'_{k1}}{q - w_{2m}v} - \sqrt{\left(2 + \frac{a'_{k1}}{q - w_{2m}v}\right)^2 - 4\frac{r+n}{r}\frac{a'_{k1}}{q - w_{2m}v}}\right]$$

$$O - S'_3: \quad t_{v2} = 24\frac{r+n}{r}w_{2m}$$

Situacija XXVIII; $S'_3 - T'_3$: $$t'_{v2} = 12\left\{2 + \frac{a_{k2}[24(r+n) - rt'_{v1}] + \frac{r+n}{r}rt'_{v1}(q - w_{2m}v)}{24(r+n)(1 - w_{2m}) - rt'_{v1}[1 - q - w_{2m}(1 - v)]} - \right.$$

$$\left. - \sqrt{\left[2 + \frac{a_{k2}[24(r+n) - rt'_{v1}] + \frac{r+n}{r}rt'_{v1}(q - w_{2m}v)}{24(r+n)(1 - w_{2m}) - rt'_{v1}[1 - q - w_{2m}(1 - v)]}\right]^2 - 4\frac{r+n}{r}\frac{a_{k2}[24(r+n) - rt'_{v1}] + 2rt'_{v1}(q - w_{2m}v)}{24(r+n)(1 - w_{2m}) - rt'_{v1}[1 - q - w_{2m}(1 - v)]}}\right\}$$

Tab. 10. Formule za određivanje trajanja varijabilnog opterećenja za uzvodnu i nizvodnu hidroelektranu za slučaj 5 (uz sl. 40).

$$v \frac{24\,(r+n) - r\,t_{vh}\,(1-v)}{24\,(r+n)\,(2\,v-1) + r\,t_{vh}\,(1-v)} \leqq q \leqq \frac{v}{2\,v-1}$$

$O - A'_2$ i $O - C'_2$ kao slučaj 1.

$$a'_{k1} \geqq a'_{1\max}$$

$$f_5(w_{2m}) = 24\,\frac{r+n}{r}\,\frac{v}{q}\,w_{2m}\left[\frac{2\,q}{1-w_{2m}\,(1-v)} - 1\right]; \quad z : t'_{v2} = f_5\,(w_{2m})$$

$$f_6(w_{2m}) = 24\,\frac{r+n}{r}\,\frac{w_{2m}\,v}{1-w_{2m}\,(1-v)}\,; \quad z' : t'_{v2} = f_6\,(w_{2m})$$

Situacija VI; $\quad O - S''_2: \quad t_{v2} = 24\,\frac{r+n}{r}\,w_{2m}$

Situacija XXII; $\quad S''_2 - Z: \quad t'_{v2} = 12\left\{2 + \frac{a_{k2} + \frac{r+n}{r}\,w_{2m}\,v}{1-w_{2m}\,(1-v)} - \right.$

$$\left. - \sqrt{\left[2 + \frac{a_{k2} + \frac{r+n}{r}\,w_{2m}\,v}{1-w_{2m}\,(1-v)}\right]^2 - 4\,\frac{r+n}{r}\,\frac{a_{k2} + 2\,w_{2m}\,v}{1-w_{2m}\,(1-v)}}\right\}$$

Situacija XXV; $\quad Z - Z': \quad t'_{v2} = 24\,\frac{r+n}{r}\,\frac{a_{k2} + 2\,w_{2m}\,v - \frac{r+n}{r}\,\frac{v}{q}\,w_{2m}\,[2\,q - 1 + w_{2m}\,(1-v)]}{(1-w_{2m})\left(2 - \frac{r+n}{r}\right) + a_{k2} + 2\,w_{2m}\,v - \frac{r+n}{r}\,\frac{v}{q}\,w_{2m}\,[2\,q - 1 + w_{2m}\,(1-v)]}$

Situacija XXVI; $Z' - Z''$: $$t'_{v2} = 24\,\frac{r+n}{r}\,\frac{a_{k2} + (1 - w_{2m})\,\frac{t'_{v1}}{24}}{a_{k2} + \frac{r+n}{r}\,(1 - w_{2m})}$$

$O - Z'_2$: $$t_{v1} = 24\,\frac{r+n}{r}\,\frac{v}{q}\,w_{2m}$$

Situacija XXVI; $Z'_2 - Z''_2$: $$t'_{v1} = \frac{24\,a_{k2}}{q - 1 + w_{2m}\,(1 - v)}$$

Situacija XXIII; $Z''_2 - D_2$: $$t'_{v1} = 12\left\{2 + \frac{a_{k2} - \frac{r+n}{r}\,(1 - w_{2m}) + \left(2 - \frac{t_{vh}}{24}\right)\frac{24\,(r+n)\,(1 - w_{2m})}{24\,(r+n) - rt_{vh}}}{q - 1 + w_{2m}\,(1 - v)} - \right.$$

$$\left. - \sqrt{\left[2 + \frac{a_{k2} - \frac{r+n}{r}\,(1 - w_{2m}) + \left(2 - \frac{t_{vh}}{24}\right)\frac{24\,(r+n)\,(1 - w_{2m})}{24\,(r+n) - rt_{vh}}}{q - 1 + w_{2m}\,(1 - v)}\right]^2 - 4\,\frac{r+n}{r}\,\frac{a_{k2} - 2\,(1 - w_{2m}) + \left(2 - \frac{t_{vh}}{24}\right)\frac{24\,(r+n)\,(1 - w_{2m})}{24\,(r+n) - rt_{vh}}}{q - 1 + w_{2m}\,(1 - v)}}\right\}$$

Situacija XXIV; $D_2 - Y_2$: $$t'_{v1} = 12\left\{2 + \frac{a_{k2} - \frac{r+n}{r}\,(1 - w_{2m})}{q - 1 + w_{2m}\,(1 - v)} - \right.$$

$$\left. - \sqrt{\left[2 + \frac{a_{k2} - \frac{r+n}{r}\,(1 - w_{2m})}{q - 1 + w_{2m}\,(1 - v)}\right]^2 - 4\,\frac{r+n}{r}\,\frac{a_{k2} - 2\,(1 - w_{2m})}{q - 1 + w_{2m}\,(1 - v)}}\right\}$$

$$\boxed{a'_{k1} < a'_{1\max}}$$

$$f'_5\,(w_{2m}) = t'_{v1}\left[1 - 2\,\frac{1 - q - w_{2m}\,(1 - v)}{1 - w_{2m} + \frac{rt'_{v1}\,(q - w_{2m}\,v)}{24\,(r+n) - rt'_{v1}}}\right]; \qquad m'': t'_{v2} = f'_5\,(w_{2m})$$

Nastavak tabele 10

$$f'_6(w_{2m}) = 24\,\frac{r+n}{r}\,\frac{\dfrac{rt'_{v1}(q-w_{2m}v)}{24(r+n)-rt'_{v1}}}{1-w_{2m}+\dfrac{rt'_{v1}(q-w_{2m}v)}{24(r+n)-rt'_{v1}}}$$

$$O-K_3:\quad t_{v1} = 24\,\frac{r+n}{r}\,\frac{v}{q}\,w_{2m}$$

Situacija sl. 22;

$$K_3-L'_3:\quad t'_{v1} = 12\left[2+\frac{a'_{k1}}{q-w_{2m}v}-\sqrt{\left(2+\frac{a'_{k1}}{q-w_{2m}v}\right)^2-4\,\frac{r+n}{r}\,\frac{a'_{k1}}{q-w_{2m}v}}\right]$$

$$O-S'_3:\quad t_{v2} = 24\,\frac{r+n}{r}\,w_{2m}$$

Situacija XXVIII;

$$S'_3-M'':\quad t'_{v2} = 12\left\{2+\frac{a_{k2}[24(r+n)-r\,t'_{v1}]+\frac{r+n}{r}\,rt'_{v1}(q-w_{2m}v)}{24(r+n)(1-w_{2m})-rt'_{v1}[1-q-w_{2m}(1-v)]}-\right.$$

$$\left.-\sqrt{\left[2+\frac{a_{k2}[24(r+n)-r\,t'_{v1}]+\frac{r+n}{r}\,rt'_{v1}(q-w_{2m}v)}{24(r+n)(1-w_{2m})-rt'_{v1}[1-q-w_{2m}(1-v)]}\right]^2-4\,\frac{r+n}{r}\,\frac{a_{k2}[24(r+n)-rt'_{v1}]+2\,rt'_{v1}(q-w_{2m}v)}{24(r+n)(1-w_{2m})-rt'_{v1}[1-q-w_{2m}(1-v)]}}\right\}$$

Situacija XXIX;

$$M''-T'_3:\quad t'_{v2} = 24\,\frac{r+n}{r}\,\frac{a_{k2}+B}{(1-w_{2m})\left(2-\frac{r+n}{r}\right)+a_{k2}+B}$$

$$B = 2\,\frac{rt'_{v1}(q-w_{2m}v)}{24(r+n)-rt'_{v1}}-\frac{t'_{v1}}{24}\left[2q-1+w_{2m}(1-v)-\frac{24(r+n)\,w_{2m}v-r\,t'_{v1}\,q}{24(r+n)-rt'_{v1}}\right]$$

prazniti akumulacija nizvodne hidroelektrane da bi se što bolje iskoristila voda u toj hidroelektrani. Smanjenje trajanja varijabilnog opterećenja nizvodne hidroelektrane dovelo bi do povećanja potrebne akumulacije, a povećanje trajanja ne može se provesti, jer hidroelektrana već radi s maksimalnim trajanjem varijabilnog opterećenja (t_{vh}). Tu je, dakle, jedini izlaz—ako ne želimo izgubiti dio raspoložive vode — smanjiti trajanje korištenja varijabilnog opterećenja uzvodne hidroelektrane. Slična je situacija XXIV, kad nizvodnoj hidroelektrani stoji na raspolaganju tolika količina vode da može trajno raditi s punom snagom, pa bi svako odstupanje od punog opterećenja izazvalo još veće gubitke vode. Dakle, za $x < w_{2m} < y$ imamo $t'_{v1} < t_{vh}$ i pored toga što je volumen akumulacije uzvodne hidroelektrane jednak ili veći od potrebnog volumena akumulacije.

Za slučaj 5 (sl. 40 i tabela 10) pojavljuju se dvije nove situacije, koje nismo upoznali u ranije prikazanim slučajevima. Za $s'' < w_{2m} < z$ imamo situaciju XXII s obzirom na volumen akumulacije. Radi velikog q zbroj $P'_{h1\,\max} + \Delta P_{h2}$ je veći od $P_{h2\,\max}$, ali to nema utjecaja na W_{ak2} sve dok je $W_A < W_B$. Značenje veličina W_A i W_B vidljivo je iz situacije XXV na sl. 36. Postavljanjem $W_A = W_B$ možemo odrediti vrijednosti t'_{v2}, za koje je ispunjena spomenuta jednakost. Ta vrijednost (t'_{v2}) prikazana je funkcijom $f_5(w_{2m})$. Sjecištem krivulje $f_5(w_{2m})$ i t'_{v2} za situaciju XXII određena je tačka Z, kad je postignuto da je $W_A = W_B$. Za veće w_{2m} vrijedi, dakle, situacija XXV, i to sve dotle dok se ne postigne da je $P_{k2} = \Delta P_{h2}$, odnosno kad je $W_A = 2\,W_B$ (situacija XXVI). Iz spomenute jednakosti možemo opet odrediti t'_{v2} kao funkciju $f_6(w_{2m})$, čije presjecište označava granicu između situacija XXV i XXVI (tačka Z' na sl. 40). Za $w_{2m} \leqq z'$ najpovoljnije rješenje predstavlja situacija XXVI, kod koje i uzvodna i nizvodna hidroelektrana rade kao da su volumeni akumulacija manji od potrebnih volumena, ali održavajući stalno jednakost $P_{k2} = P'_{k1} + \Delta P_{h2}$. Kad postane $t'_{v2} = t_{vh}$ dolazimo do situacije XXIII, a za još veće w_{2m} do situacije XXIV, koje su se pojavile već u slučaju 4.

Treba napomenuti da se situacije XXV i XXVI mogu pojaviti i u slučaju 4, a njihova se pojava određuje pomoću $f_5(w_{2m})$ i $f_6(w_{2m})$.

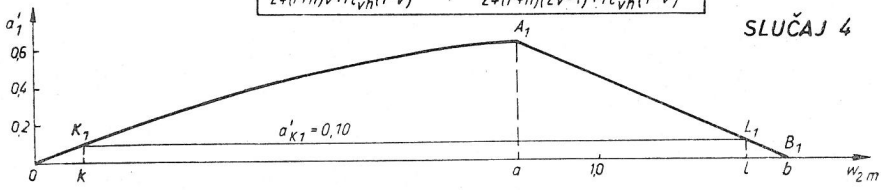
Razmotrimo sada slučajeve kad je i $a'_{k1} < a'_{1\,\max}$ i $a_{k2} < a_{2\,\max}$. Svi slučajevi prikazani su na istim slikama i istim tablicama kao i prethodno opisani.

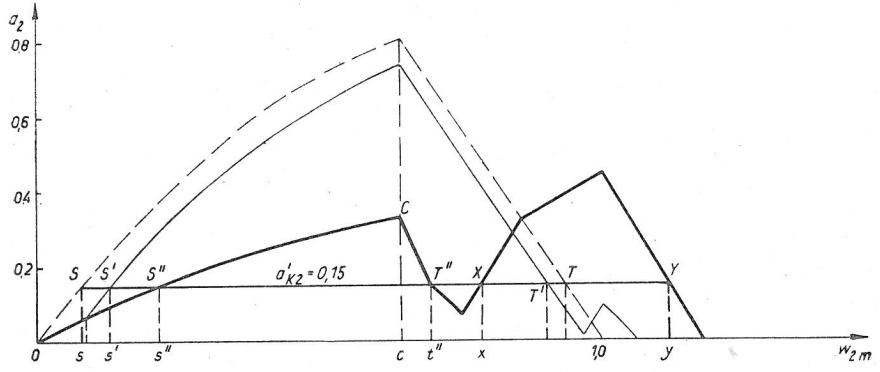
Za male vrijednosti q (slučaj 1) imamo dvije nove situacije — XXVII i XXVIII — (sl. 41). U prvoj je $t'_{v1} > t'_{v2}$, a u drugoj je $t'_{v1} < t'_{v2}$. Granica pojave tih dviju situacija je tačka M, za koju vrijedi da je $t'_{v1} = t'_{v2}$. Za $l < w_{2m} < b$ volumen uzvodne akumulacije je veći od potrebnog volumena, pa dolazimo do situacije XXI (sl. 36), koju smo upoznali za slučaj kad je $a'_{k1} \geqq a'_{1\,\max}$. Za $w_{2m} > b$ kao i ranije uzvodna hidroelektrana nema utjecaja na nizvodnu hidroelektranu.

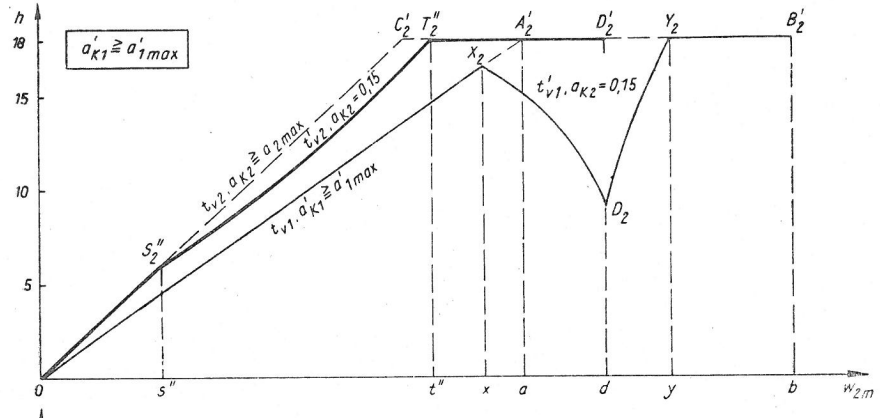
Potpuno isto stanje imamo u slučaju 2.

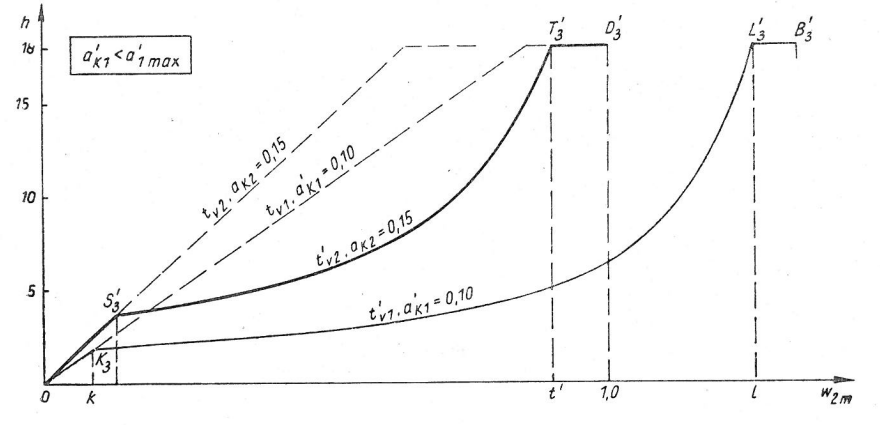
$$\frac{24(r+n)v}{24(r+n)v+rt_{vh}(1-v)} \leq q \leq \frac{24(r+n)-rt_{vh}(1-v)}{24(r+n)(2v-1)+rt_{vh}(1-v)}v$$

SLUČAJ 4



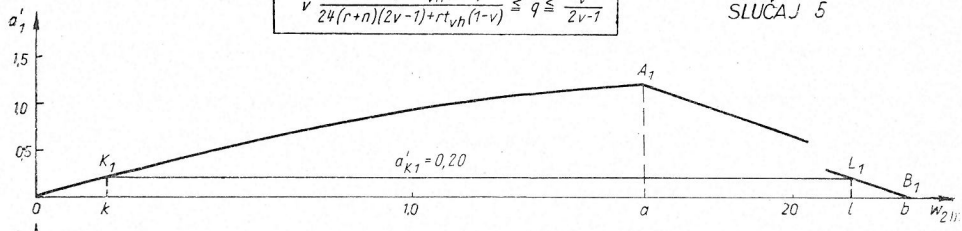


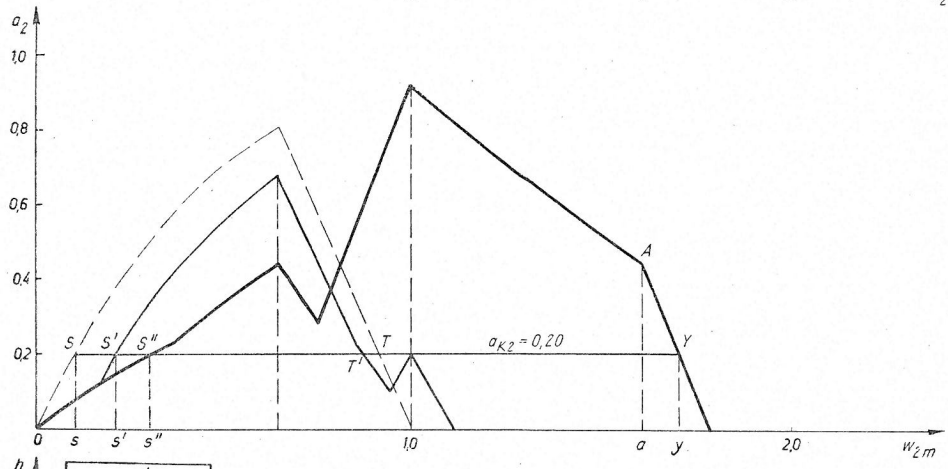


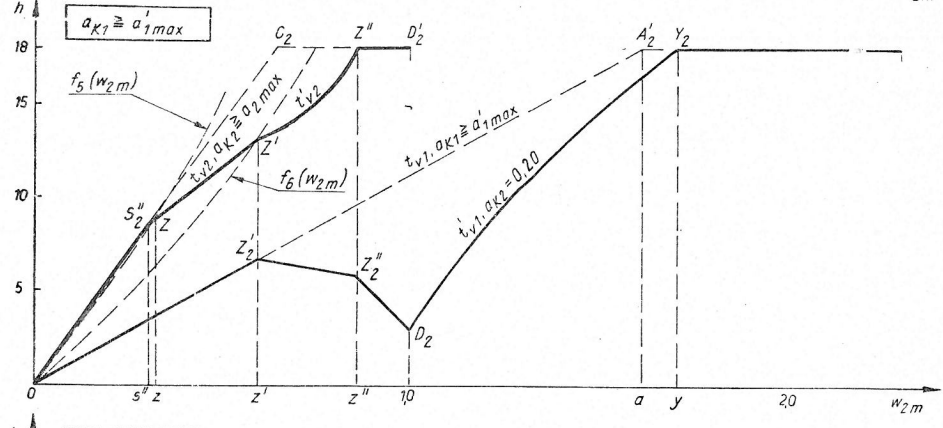


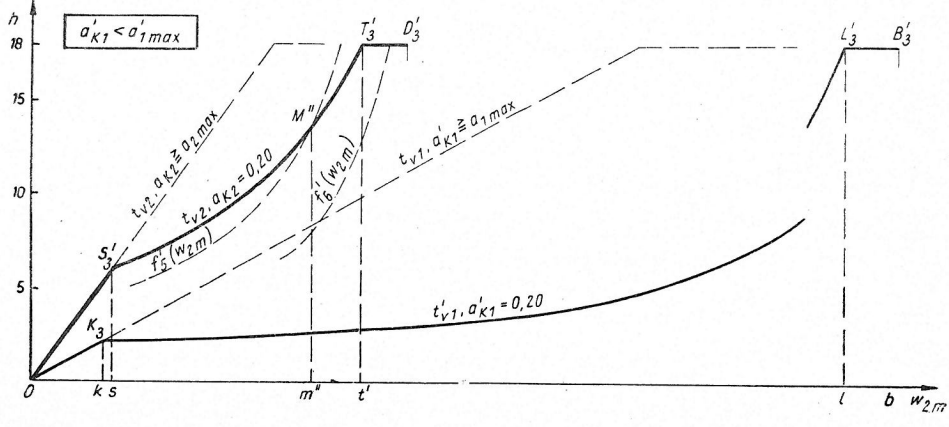
$$v\,\frac{24(r+n)-rt_{vh}(1-v)}{24(r+n)(2v-1)+rt_{vh}(1-v)} \leqq q \leqq \frac{v}{2v-1}$$

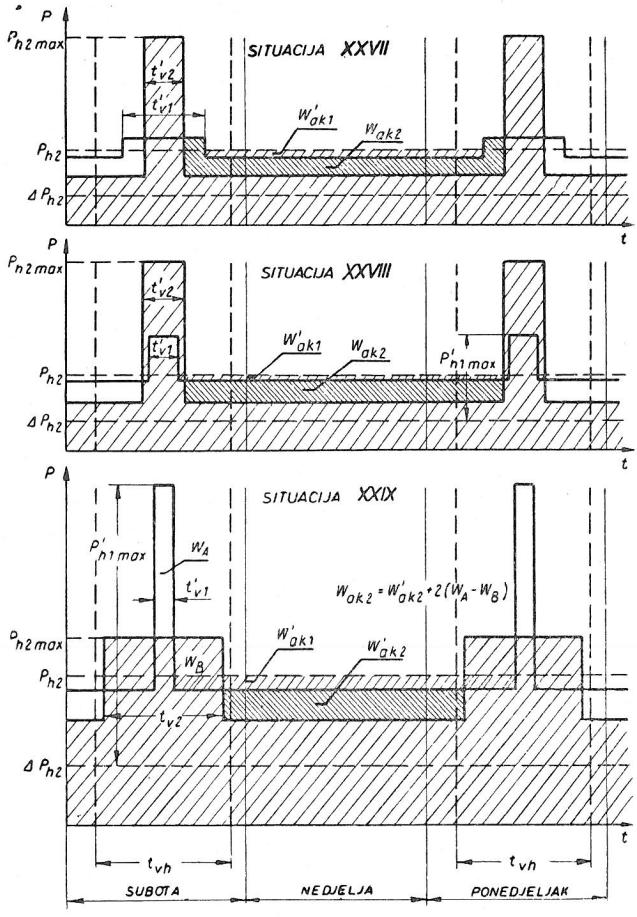
SLUČAJ 5











Sl. 41. Situacije rasporeda reguliranih protoka za određivanje trajanja varijabilnog opterećenja nizvodne hidroelektrane uz pretpostavku da je relativna energetska vrijednost uzvodne akumulacije manja od maksimalno potrebne (situacija XXVII—XXIX)

Sl. 39. Trajanja varijabilnog opterećenja za uzvodnu i nizvodnu hidroelektranu u ovisnosti o relativnoj mogućoj proizvodnji nizvodne hidroelektrane za slučaj 4 (Primjer za $v = 0{,}60$ i $q = 0{,}80$).

Sl. 40. Trajanja varijabilnog opterećenja za uzvodnu i nizvodnu hidroelektranu u ovisnosti o relativnoj mogućoj proizvodnji nizvodne hidroelektrane za slučaj 5 (Primjer za $v = 0{,}60$ i $q = 1{,}50$).

U slučajevima 3 i 4 nema situacije XXVII, već se javlja samo situacija XXVIII.

U slučaju 5 za pretpostavljenu relativnu vrijednost akumulacije a_{k2} pojavljuje se situacija XXIX, koja se pojavljuje za $w_{2m} > m''$. Tačka M'' određena je pomoću funkcije $f'_5(w_{2m})$, koja ima isto značenje kao $f_5(w_{2m})$.

Treba napomenuti da se za veće vrijednosti a'_{k1} i manje vrijednosti a_{k2} mogu pojaviti situacije XXIII, XXIV i XXVI. Određivanje vrijednosti t'_{v1} i t'_{v2} vrši se u tim slučajevima pomoću istih formula koje vrijede za $a'_{k1} \geqq a'_{1\,\max}$.

d) Lanac više hidroelektrana

Dosadašnja razmatranja odnosila su se na dvije hidroelektrane, ali se mogu protegnuti i na lanac od više hidroelektrana. Analiza počinje od prve dvije hidroelektrane u lancu na način opisan u prethodnim odjeljcima ovog poglavlja. Nakon toga se prelazi na analizu druge i treće hidroelektrane, s tim da se sve veličine reduciraju na treću hidroelektranu. Ako je potrebni volumen akumulacije druge hidroelektrane veći ili jednak korisnom volumenu akumulacije, drugu hidroelektranu u odnosu na treću možemo razmatrati na isti način kao što smo razmatrali prvu u odnosu na drugu hidroelektranu i to bez obzira na oblik krivulje $a_2 = f(w_{2m})$. Međutim, ako taj uvijet nije ispunjen, u račun treba ući s već određenim vrijednostima $t'_{v2} = f(w_{3m})$ na način kako je proveden račun pomoću krivulje $t'_{v1} = f(w_{2m})$.

Razmatrajući, dakle, dvije po dvije hidroelektrane može se za cijeli lanac hidroelektrana odrediti količina varijabilne i konstantne energije što je u krajnjoj liniji i svrha ovih razmatranja.

e) Potrebna energetska vrijednost akumulacije za međusobno udaljene hidroelektrane

Sva dosadašnja razmatranja odnosila su se na hidroelektrane koje neposredno slijede jedna drugu. Ako su, međutim, hidroelektrane međusobno udaljene, potrebno je vrijeme Δt da vodni val iz uzvodne hidroelektrane stigne u akumulaciju nizvodne hidroelektrane. Kad se radi o malim vremenima Δt (red veličine jedan do dva sata), može se s dovoljno tačnosti računati kao da je $\Delta t = 0$. To pogotovo vrijedi za slučajeve kad je volumen akumulacije uzvodne hidroelektrane manji od maksimalno potrebnog volumena.

Eliminiranje utjecaja razmaka među hidroelektranama može se ostvariti bilo korištenjem akumulacionog bazena uzvodne hidroelektrane, koja je posljednja u uzvodnom dijelu lanca hidroelektrana kao kompenzacionog bazena, koji ima zadatak da izravna protoke, bilo povećanjem akumulacionog bazena nizvodne hidroelektrane, koja je prva u nizvodnom dijelu lanca hidroelektrana ako nije dovoljno velik da bi omogućio eliminiranje spomenutog utjecaja.

Potrebna relativna energetska vrijednost kompenzacionog akumulacionog bazena koji se nalazi neposredno ispod hidroelektrane čija se voda želi izravnati reducirana na uzvodnu hidroelektranu iznosi

$$a_{k\,\max} = \frac{rt'_{v1c}}{24}\,\frac{2\cdot 24 - t'_{v1c}}{24\,(r+n)}\,\frac{24\,(r+n) - rt_{vh}}{24\,(r+n) - rt'_{v1c}} \tag{129}$$

gdje je t'_{v1c} trajanje varijabilnog opterećenja uzvodne hidroelektrane, koje se postiže za w_{1m} prema (70), kad je potreban najveći volumen akumulacije za izravnavanje protoka. Izraz (129) vrijedi za $a_{k1} < a_{1\,\max}$, dok za $a_{k1} \geqq a_{1\,\max}$ treba postaviti $t'_{v1c} = t_{vh}$.

Prilikom određivanja potrebne maksimalne relativne vrijednosti akumulacionog bazena nizvodne udaljene hidroelektrane, potrebno je znati da udaljenost među hidroelektranama ima utjecaja na maksimalno potrebni volumen samo kad je relativna proizvodnja jednaka veličini iz izraza (70). Za $w_{2m} = 1$ maksimalno potrebni volumen akumulacije, za bilo koji $\Delta\, t$ jednak je potrebnom volumenu za $\Delta\, t = 0$, a taj je određen relacijom (128). Za određivanje maksimalne relativne vrijednosti akumulacije za w_{2m} prema (70) treba razlikovati četiri slučaja.

U slučaju A, koji je jednak slučaju 1, definiranom relacijom (112), nema utjecaja vrijeme $\Delta\, t$ na potrebni maksimalni volumen nizvodne udaljene hidroelektrane, jer se potrebni maksimalni volumen pojavljuje onda kad uzvodna hidroelektrana radi s konstantnim pro-

Tab. 11. Formule za određivanje maksimalno potrebne energetske vrijednosti akumulacije u nizvodnoj udaljenoj hidroelektrani za $w_{2m} = \dfrac{rt_{vh}}{24\,(r+n)}$.

Slučaj A:

$$\boxed{0 \leqq q \leqq \frac{r\,t_{vh}}{24\,(r+n)}\,v}$$

za sve situacije

$$a_{2\max} = \frac{r\,t_{vh}}{24}\,\frac{2\cdot 24 - t_{vh}}{24\,(r+n)}$$

Slučaj B:

$$\boxed{\frac{r\,t_{vh}}{24\,(r+n)}\,v \leqq q \leqq 1 - \frac{r\,t_{vh}}{24\,(r+n)}\,(1-v)}$$

Situacija $B\,1$: $\Delta t = 0$;

$$a_{2\max 0} = \frac{r\,t_{vh}}{24}\,\frac{2\cdot 24 - t_{vh}}{24\,(r+n)}\,\frac{24\,(r+n)\left(1 - \frac{t'_{v1c}}{t_{vh}}\,q\right) - r\,t'_{v1c}\,(1-v)}{24\,(r+n) - r\,t'_{v1c}}$$

Situacija $B\,2$: $0 < \Delta t \leqq \frac{1}{2}\,(t_{vh} - t'_{v1c})$;

$a_{2\max}$ kao Situacija $B\,1$

Situacija $B\,3$: $\frac{1}{2}\,(t_{vh} - t'_{v1c}) \leqq \Delta t \leqq \frac{1}{2}\,(t_{vh} + t'_{v1c})$;

$$a_{2\max} = a_{2\max 0} + \left(\frac{\Delta t}{24} - \frac{1}{2}\,\frac{t_{vh} - t'_{v1c}}{24}\right)\frac{24\,(r+n)\,q - r\,t_{vh}\,v}{24\,(r+n) - r\,t'_{v1c}}$$

Situacija $B\,4$: $\frac{1}{2}\,(t_{vh} + t'_{v1c}) \leqq \Delta t \leqq 24 + \frac{1}{2}\,(t_{vh} - t'_{v1c})$;

$$a_{2\max} = a_{2\max 0} + \frac{t'_{v1c}}{24}\,\frac{24\,(r+n)\,q - r\,t_{vh}\,v}{24\,(r+n) - r\,t'_{v1c}}$$

Slučaj C:

$$\boxed{1 - \frac{r\,t_{vh}}{24\,(r+n)}\,(1-v) \leqq q \leqq q'}$$

Situacija $C\,1$: $\Delta t = 0$;

$a_{2\max} = a_{2\max 0}$

Situacija $C\,2$: $0 < \Delta t \leqq \frac{1}{2}\,(t_{vh} - t'_{v1c}) - t'_{v1c}\,\cdot$

$$\cdot\,\frac{[24\,(r+n) - r\,t'_{v1c}]\left[q - 1 + \frac{r t_{vh}}{24\,(r+n)}\,(1-v)\right]}{24\,(r+n) - r\,t_{vh} + r\,t'_{v1c}\left[q - 1 + \frac{r t_{vh}}{24\,(r+n)}\,(1-v)\right]}\,;$$

$a_{2\max} = a_{2\max 0}$

Situacija $C\,3$: $\frac{1}{2}\,(t_{vh} - t'_{v1c}) - t'_{v1c}\,\cdot$

$$\cdot\,\frac{[24\,(r+n) - r\,t'_{v1c}]\left[q - 1 + \frac{r t_{vh}}{24\,(r+n)}\,(1-v)\right]}{24\,(r+n) - r\,t_{vh} + r\,t'_{v1c}\left[q - 1 + \frac{r t_{vh}}{24\,(r+n)}\,(1-v)\right]} \leqq \Delta t \leqq \frac{1}{2}\,(t_{vh1} - t'_{v1c})$$

$$a_{2\max} = a_{2\max 0} + \frac{t'_{v1c}}{24}\left[q - 1 + \frac{r\,t_{vh}}{24\,(r+n)}\,(1-v)\right] -$$

$$- \left(\frac{1}{2}\,\frac{t_{vh} - t'_{v1c}}{24} - \frac{\Delta t}{24}\right)\frac{24\,(r+n) - r\,t_{vh} + r\,t'_{v1c}\left[q - 1 + \frac{r t_{vh}}{24\,(r+n)}\,(1-v)\right]}{24\,(r+n) - r\,t'_{v1c}}$$

Nastvak Tabele 11

Situacija $C\,4$: $\frac{1}{2}(t_{vh} - t'_{v1c}) \leqq \Delta t \leqq \frac{1}{2}(t_{vh} + t'_{v1c})$;

$$a_{2\max} = a_{2\max 0} + \frac{t'_{v1c}}{24}\left[q - 1 + \frac{r\,t_{vh}}{24\,(r+n)}(1-v)\right] +$$

$$+\left(\frac{\Delta t}{24} - \frac{1}{2}\,\frac{t_{vh} - t'_{v1c}}{24}\right)\frac{24\,(r+n) - r\,t_{vh} + r\,t'_{v1c}\left[q - 1 + \frac{rt_{vh}}{24\,(r+n)}(1-v)\right]}{24\,(r+n) - rt'_{cv1}}$$

Situacija $C\,5$: $\frac{1}{2}(t_{vh} + t'_{v1c}) \leqq \Delta t \leqq 24 + \frac{1}{2}(t_{vh} - t'_{v1c})$:

$a_{2\max}$ kao Situacija $B\,4$

kao D: $\boxed{q > q'}$

Situacija $D\,1$: $\Delta t = 0$;

$$a_{2\max} = a_{2\max 0} + 2\,\frac{t'_{v1c}}{24}\,\frac{24\,(r+n)\,q - r\,t_{vh}\,v}{24\,(r+n) - r\,t'_{v1c}} -$$

$$-\frac{t_{vh} + t'_{v1c}}{24}\,\frac{24\,(r+n) - r\,t_{vh} + rt'_{v1c}\left[q - 1 + \frac{rt_{vh}}{24\,(r+n)}(1-v)\right]}{24\,(r+n) - r\,t'_{v1c}}$$

Situacija $D\,2$: $0 < t \leqq t'_{v1c}\,\dfrac{[24\,(r+n) - rt'_{v1c}]\left[q - 1 + \frac{rt_{vh}}{24\,(r+n)}(1-v)\right]}{24\,(r+n) - rt_{vh} + rt'_{v1c}\left[q - 1 + \frac{rt_{vh}}{24\,(r+n)}(1-v)\right]} -$

$$-\frac{1}{2}(t_{vh} - t'_{v1c});$$

$a_{2\max}$ kao Situacija $D\,1$

Situacija $D\,3$: $t'_{v1c}\,\dfrac{[24\,(r+n) - rt'_{v1c}]\left[q - 1 + \frac{rt_{vh}}{24\,(r+n)}(1-v)\right]}{24\,(r+n) - rt_{vh} + rt'_{v1c}\left[q - 1 + \frac{rt_{vh}}{24\,(r+n)}(1-v)\right]} -$

$$-\frac{1}{2}(t_{vh} - t'_{v1c}) \leqq \Delta t \leqq \frac{1}{2}(t_{vh} - t'_{v1c})$$

$a_{2\max}$ kao Situacija $C\,3$

Situacija $D\,4$: $\frac{1}{2}(t_{vh} - t'_{v1c}) \leqq \Delta t \leqq \frac{1}{2}(t_{vh} + t'_{v1c})$;

$a_{2\max}$ kao Situacija $C\,4$

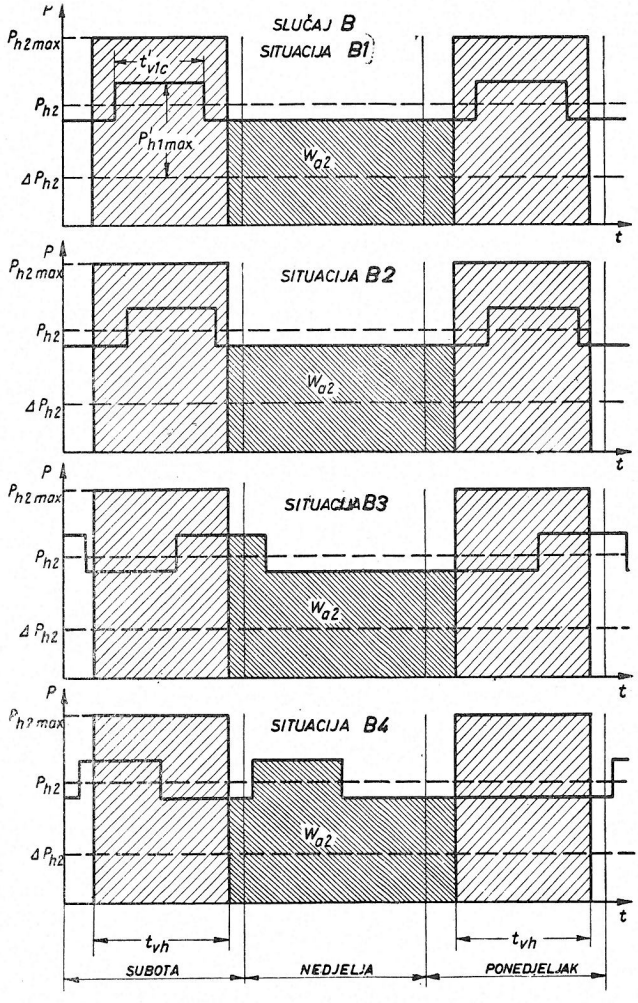
Situacija $D\,5$: $\frac{1}{2}(t_{vh} + t'_{v1c}) \leqq \Delta t \leqq 24 + \frac{1}{2}(t_{vh} - t'_{v1c})$;

$a_{2\max}$ kao Situacija $B\,4$

tokom. Maksimalna relativna akumulacija određuje se prema relaciji (71).

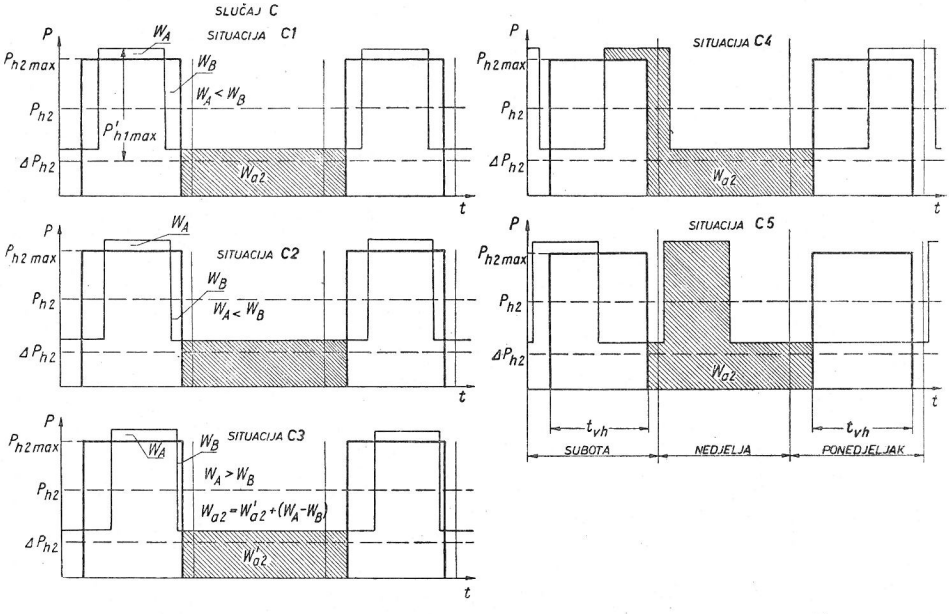
Slučaj B je definiran relacijom

$$\frac{rt_{vh}}{24\,(r+n)}\,v \leqq q \leqq 1-\frac{rt_{vh}}{24\,(r+n)}\,(1-v) \tag{130}$$



Sl. 42. Situacija rasporeda reguliranih protoka u nizvodnoj hidroelektrani za $w_{2m}=\frac{rt_{vh}}{24\,(r+n)}$, a za određivanje maksimalno potrebne energetske vrijednosti akumulacije nizvodne hidroelektrane (slučaj *B*)

a moguće situacije u ovisnosti o Δt prikazane su na sl. 42, dok su formule za maksimalno potrebnu vrijednost akumulacije navedene u tabeli 11. Situacija B1 odgovara za $\Delta t = 0$, a potrebni volumen akumulacije ostaje nepromijenjen i u situaciji B2. U situaciji B3 dio vodnog vala uzvodne hidroelektrane pojavljuje se u donjoj hidroelektrani u razdoblju malih opterećenja, dok se u situaciji B4 puni vodni val radnog dana pojavljuje u razdoblju malih opterećenja. Prilikom



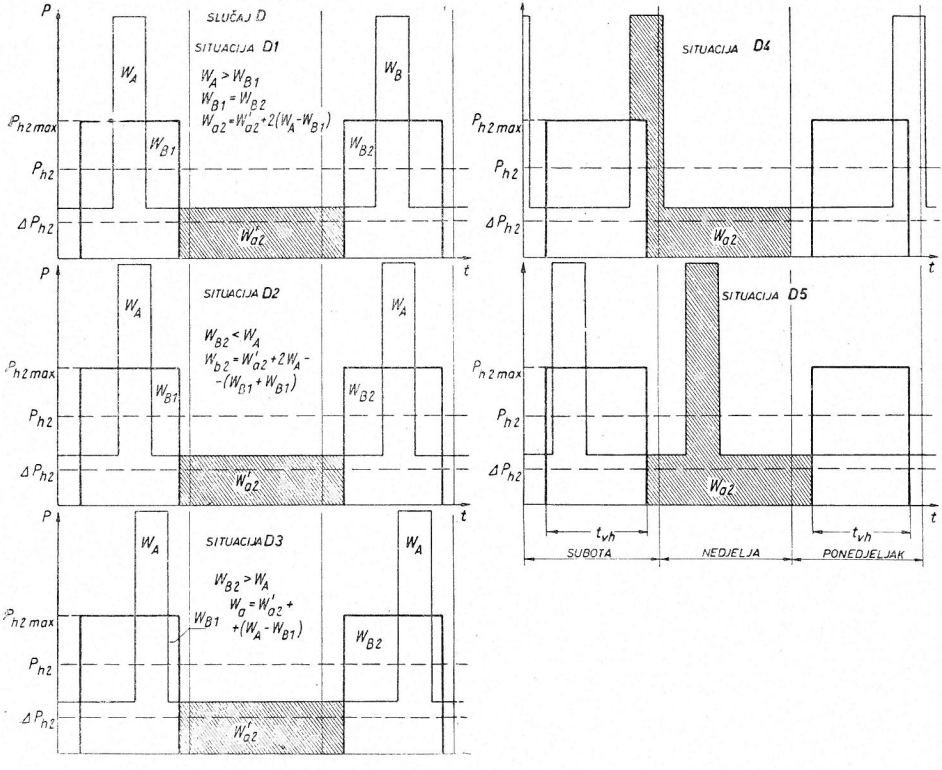
Sl. 43. Situacija rasporeda reguliranih protoka u nizvodnoj hidroelektrani za $w_{2m} = \frac{rt_{vh}}{24\ (r+n)}$ određivanje maksimalno potrebne energetske vrijednosti akumulacije nizvodne hidroelektrane (slučaj C).

određivanja vrijednosti $a_{2\,\max}$ pretpostavljeno je da nema deformacije vodnog vala, pa navedene formule predstavljaju teorijsku maksimalnu vrijednost. Osim toga, navedene su formule do $\Delta t = 24$ h, jer će za veće udaljenosti doći do tolike deformacije vala, da će se moći zanemariti utjecaj uzvodne hidroelektrane. Sve formule za $a_{2\,\max}$ navedene su uz pretpostavku da je $a'_{k1} < a'_{1\,\max}$, pa za $a'_{k1} \geqq a'_{1\,\max}$ mjesto $t'_{v1\,e}$ treba uvrstiti vrijednosti za t_{v1} prema (120).

Za slučaj C vrijede granice

$$1 - \frac{rt_{vh}}{24\,(r+n)}\,(1-\mathrm{v}) \leqq q \leqq q' \qquad (131)$$

gdje je q' ona vrijednost omjera q pri kojoj se za w_{2m} prema (70) i za $\Delta t = 0$ postiže $W_A = W_B$ (sl. 43). Za $a'_{k1} \geqq a'_{1\,max}$ veličina q' je jednaka gornjoj granici slučaja 4 (124). Unutar granica (131) za $\Delta t = 0$ imamo, dakle, $W_A < W_B$. Povećavanjem Δt smanjuje se W_A, dok W_B ostaje nepromijenjen, pa granicu između situacija C2 i C3 predstavlja vrijeme Δt kad se postiže jednakost $W_A = W_B$. Situaciju C3 imamo sve dok ne postane $W_B = 0$, kad se pojavljuje situacija C4. Izrazi za granice Δt i $a_{2\,max}$ navedeni su u tabeli 11.



Sl. 44. Situacija rasporeda reguliranih protoka u nizvodnoj hidroelektrani za $w_{2m} = \dfrac{r t_{vh}}{24\,(r+n)}$, a za određivanje maksimalno potrebne energetske vrijednosti akumulacije nizvodne hidroelektrane (slučaj D)

Slučaj D nastupa kad je $q > q'$ pa tada već za $\Delta t = 0$ imamo da je $W_A > W_B$. Sada, međutim, moramo razlikovati W_{B1} i W_{B2} (sl. 44). Sve dok se ne postigne da je $W_{B2} = W_A$ imamo situaciju D2, za koju je maksimalno potrebna vrijednost jednaka vrijednosti za $\Delta t = 0$. Za $W_{B2} > W_A$ (situacija D3) nemaju više utjecaja prilike

u radnom danu nakon neradnog dana na potrebni volumen akumulacije, pa imamo isto stanje kao u situaciji C3. Situacije D4 i D5 odgovaraju situacijama C4 i C5.

I sada treba usporediti potrebni volumen za w_{2m} prema (70) i $w_{2m} = 1$, pa veći od njih predstavlja maksimalno potrebni volumen akumulacije nizvodne udaljene hidroelektrane.

f) Promjenljivost omjera dotoka

Dijagrami prikazani u ovom poglavlju zasnivaju se na pretpostavci da je omjer dotoka v (104) konstantna veličina. Takva pretpostavka može s dovoljnom tačnošću vrijediti za bliže hidroelektrane, koje nemaju akumulacioni bazen sa sezonskom akumulacijom. Ako u uzvodnoj hidroelektrani postoji sezonska akumulacija, omjer v može varirati u vrlo širokim granicama, jer tada on prikazuje omjer između količine vode koja se ispušta iz sezonske akumulacije i zbroja međudotoka i količine vode koja se ispušta iz sezonske akumulacije. Naravno da je prilikom određivanja svih veličina potrebno uzeti u obzir i tu promjenljivost omjera dotoka.

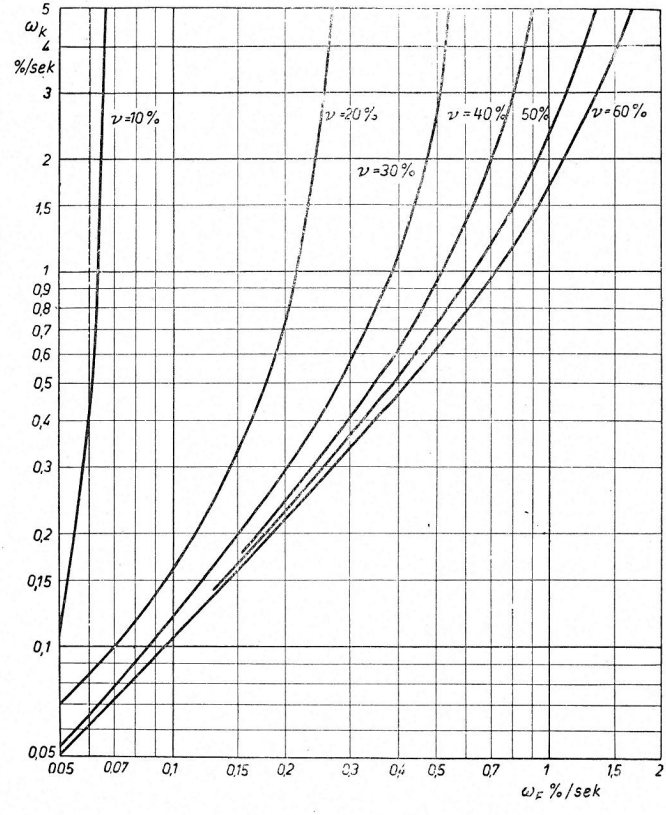
5. Prilagođavanje elektrana dijagramu opterećenja

U pogledu prilagođavanja opterećenja elektrana dijagramu opterećenja postoji znatna razlika između hidroelektrana i termoelektrana.

Akumulacione hidroelektrane s tlačnim dovodom mogu se prilagoditi promjenama opterećenja onom brzinom koja je jednaka djelovanju regulatora turbine, a to praktički znači — momentano. Međutim, za trajnije povećanje opterećenja akumulacione hidroelektrane s gravitacionim dovodom, nije dovoljno samo otvaranje dovoda vode pred turbinom, već i otvaranje zapornih organa na ulazu. Da bi se postiglo, dakle, povećanje opterećenja u hidroelektrani s gravitacionim dovodom, potrebno je barem onoliko vremena koliko treba da voda stigne od zahvata do turbine. To praktički vrijedi i za smanjenje opterećenja, ako ne želimo da dođe do prelijeva na vodostanu.

Granicu povećanja opterećenja u akumulacionim hidroelektranama predstavlja maksimalna snaga, koja ovisi o raspoloživom padu u promatranom momentu, a ne ovisi o dotoku u akumulacioni bazen. Koliko dugo može hidroelektrana raditi s maksimalnom snagom ovisi o veličini izgradnje, dotoku i volumenu akumulacije, a koliko dugo treba, ako uopće treba, da hidroelektrana radi s maksimalnom snagom ovisi o njezinoj ulozi u elektroenergetskom sistemu.

Međutim, u protočnoj hidroelektrani maksimalna snaga je određena i dotokom i raspoloživim padom, jer se turbinama ne smije dovoditi više vode nego što dotječe, jer će u protivnom gornji nivo vode pasti, pa će turbine ostati bez nje. Naravno, tehnički je moguće da se protočna hidroelektrana prilagodi potrebama, ali svako odstupanje od snage, koja odgovara dotoku, dovodi do gubitaka vode.



Sl. 45. Sposobnost regulacije kotla (ω_k) u ovisnosti o sposobnosti regulacije loženja (ω_F) za različita povećanja opterećenja (ν) u % od maksimalnog učina kotla uz pretpostavku da je dodatna proizvodnja pare s = 2 kg/t/h za smanjenje tlaka od 5%.

Ni u akumulacionoj ni u protočnoj hidroelektrani nema tehničkih poteškoća za obustavljanje i za ponovno stavljanje u pogon. Ograničenje brzine stavljanja u pogon, odnosno obaveza propuštanja određenih količina vode, može biti posljedica obaveza prema nizvodnim korisnicima.

U termoelektranama treba razlikovati mogućnost prilagođavanja promjenama opterećenja u razdoblju velikih opterećenja i mogućnost prilagođavanja malim opterećenjima.

Mogućnost brzine promjene opterećenja kotlova ovisi o dva faktora: o sposobnosti regulacije loženja i pomoćnih pogona, te o sposobnosti akumuliranja topline u kotlu. Sposobnost regulacije loženja (ω_F) s utjecajem pomoćnih pogona definirana je kao mogućnost porasta opterećenja u % od maksimalnog učina kotla u sekundi. Ta sposobnost za kotlove s prirodnom cirkulacijom kreće se od oko 0,1%/sek do oko 0,8%/sek. [14], što ovisi o načinu loženja, vrsti kotla i vrsti ugljena. Sposobnost regulacije loženja kotlova s prisilnom cirkulacijom može iznositi i do 3%/sek. Sposobnost akumuliranja topline u vodi kotla još više povećava mogućnost brze promjene opterećenja kotla. MUSIL [14] daje za sposobnost regulacije kotla (ω_K), u kojoj su uključena oba gore spomenuta faktora, izraz

$$\omega_K = \frac{\omega_F}{1 - 720 \frac{s\,\omega_F}{v^2}} \%/\text{sek} \tag{132}$$

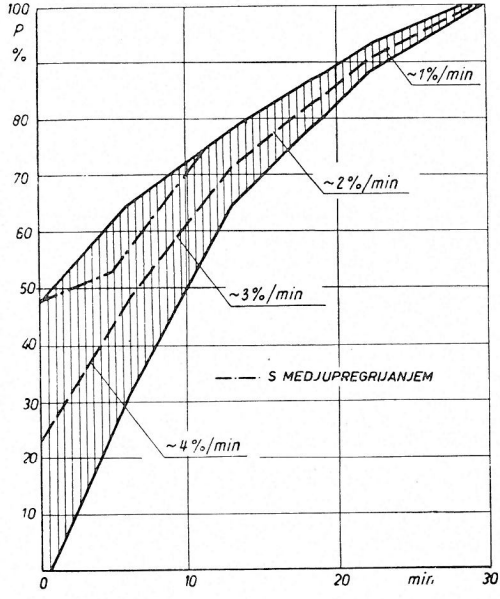
gdje je s dodatna proizvodnja pare u kg po t/h učina kotla, a v povećanje opterećenja u % od maksimalnog učina kotla. Sposobnost regulacije kotla prikazana je na sl. 45 uz pretpostavku da je $s = 2$ kg/t/h, što je prosječna vrijednost za dodatnu proizvodnju pare.

Ograničenje brzine promjene opterećenja parne turbine određeno je dodatnim naprezanjem kućišta, što je posljedica promjene temperature i tlaka pare. Uz pretpostavku da je turbina prilikom upuštanja dobro zagrijana, može se [15] brzina promjene opterećenja prikazati dijagramima na sl. 46. Srednja crtkana linija prikazuje mogućnost promjene opterećenja po unaprijed utvrđenom voznom redu. Osim toga, moguće su promjene opterećenja po svakoj liniji koja leži između gornje i donje linije. Poraste li, na primjer, opterećenje od donje granične na gornju graničnu liniju, daljnja promjena opterećenja smije se vršiti po gornjoj graničnoj liniji.

Uspoređujući podatke na sl. 45 i 46 dolazimo do zaključka da je za mogućnost prilagođavanja potrebama mjerodavna turbina, jer je dozvoljena brzina promjene kod turbine manja od moguće promjene opterećenja kotla.

Pitanje prilagođavanja potrebama u razdoblju malih opterećenja nije, međutim, samo tehničko već i ekonomsko pitanje. Postoje, naime, u principu dvije mogućnosti: prvo, obustava dijela agregatâ ili dijela termoelektrana koje je bilo potrebno staviti u pogon za pokrivanje potreba u razdoblju velikih opterećenja, i drugo, neobustavljanje u razdoblju malih opterećenja. Obustava agregata izaziva dodatni po-

trošak goriva za stavljanje u pogon kotla i turbine, kao i za potrošak za vrijeme obustave (otplinjavanje, polagano okretanje agregata i slično). S druge strane, neobustavljanje agregata dovodi do potrebe da agregati, ili dio agregatâ, rade s malim opterećenjem pri kojem je stupanj djelovanja nizak, što također izaziva dodatni potrošak goriva. Uspoređivanjem dodatnog potroška radi obustavljanja i dodatnog potroška radi neobustavljanja, a uzevši u obzir trajanje malih opterećenja, donosi se odluka o načinu pogona u tom razdoblju [16]. Takvu situaciju imamo u elektroenergetskom sistemu, u kojem rade same termoelektrane ili u kojem je udio hidroelektrana neznatan, a omjer minimalnog i maksimalnog opterećenja m_0 (2) nije suviše nizak.

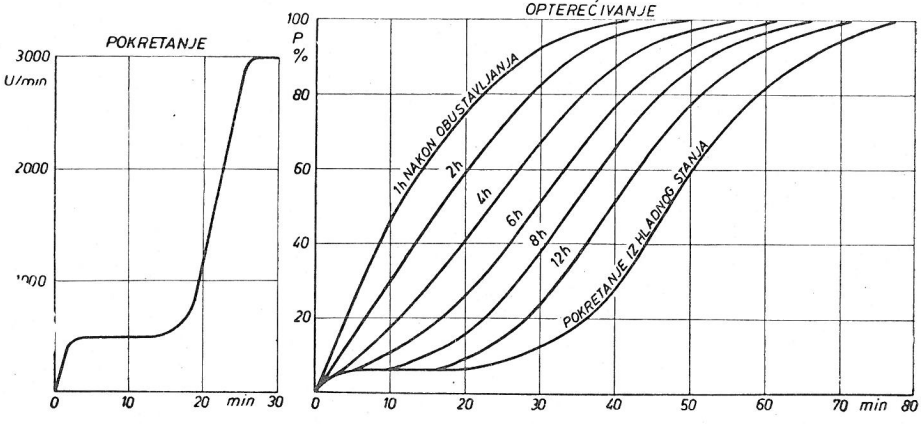


Sl. 46. Granice brzine promjene opterecenja parne turbine [15].

U elektroenergetskom sistemu, u kojem je udio hidroelektrana značajan pojavljuje se u periodu velikih voda potreba obustavljanja agregata u termoelektranama radi sprečavanja preljeva u razdoblju malih opterećenja, jer je radi tehničkog minimuma [17] nemoguće ispod određene granice smanjiti proizvodnju termoelektrana. Takva situacija može nastupiti i u sistemu samih termoelektrana, kad je omjer m_0 (2) vrlo nizak, pa je suma tehničkih minimuma agregata veća od minimalnog opterećenja. U prvom slučaju obustavljanje agregata predstavlja smanjenje ukupne potrošnje goriva, koja bi bila potrošena za slučaj neo-

bustavljanja agregata, pa je obustavljanje još povoljnije nego kad se radi samo o razlici potroška između rada s povoljnim i nepovoljnim stupnjem djelovanja. U drugom slučaju se radi o nužnom obustavljanju agregata radi nepovoljnog dijagrama opterećenja.

Tehnički minimum kotlova ovisi o vrsti loženja kao i o vrsti goriva, a posljedica je nemogućnosti održavanja stabilnog izgaranja. Kotlove s loženjem na rešetki možemo održati u pogonu u praznom hodu, što nije slučaj s kotlovima loženim ugljenom prašinom, kod kojih tehnički minimum ovisi, uglavnom, o sadržaju hlapivih sastojaka u gorivu. Tehnički minimum kotla može se smanjiti uvođenjem vrlo



Sl. 47. Trajanje stavljanja u pogon i optrećenja parne turbine s temperaturom pare na ulazu od 525° C [19].

vrućeg zraka u komoru za izgaranje, kao i postavljanjem pomoćnih sapnica za loženje, na primjer, mazuta, koje se stavljaju u pogon samo u slučaju pogona sa sniženim tehničkim minimumom.

Tehnički minimum turboagregata je određen temperaturom pare na izlazu iz turbine [16], a praktički može raditi u praznom hodu uz uvjet da se poduzmu posebne mjere, naročito što se tiče hlađenja ejektora (korištenje sirove vode) i dobave pare za otplinjač pojne vode [19].

Potrošak goriva za ponovno stavljanje u pogon ovisi o trajanju obustave, kao i o vremenu potrebnom za ponovno stavljanje u pogon. Za vrijeme obustave preko noći (4 do 8 sati) ni kotao ni turbina [18] ne ohlade se toliko da bi bilo potrebno dulje vrijeme za zagrijavanje kotla [16] i za stavljanje u pogon i opterećivanje turbogeneratora [19]. Na sl. 47 prikazano je stavljanje u pogon i opterećivanje turbogeneratora s temperaturom pare na ulazu od 525°C [19] u ovisnosti o trajanju obustave.

6. Troškovi u elektranama

Troškove dijelimo na dvije grupe: stalni troškovi i promjenljivi troškovi.

Stalni troškovi su uglavnom proporcionalni investicijama, jer njihov najveći dio čine kamati, otpisi, obnova i slično, koji su proporcionalni investicijama. Izdaci za održavanje, plaće, upravu i drugo, nisu ovisni o visini investicija, ali su u najvećem dijelu neovisni o proizvodnji elektrane, pa ih za pojedinu elektranu možemo, također, prikazati kao troškove proporcionalne investicijama.

Promjenljivi troškovi ovise o načinu korištenja postrojenja; daleko najveći dio čine troškovi za pogonsko gorivo, a tek mali dio troškovi plaća i uzdržavanja koji su ovisni o načinu korištenja postrojenja.

U hidroelektranama praktički postoje samo stalni troškovi koje, možemo prikazati izrazom

$$K_h = \alpha_h I_h \tag{133}$$

gdje je α_h kvota godišnjih troškova, a I_h investicije. Kvota godišnjih troškova ovisi o visini kamatnjaka i o tipu hidroelektrane, odnosno o odnosu investicija za građevinske radove i opremu, jer su otp.si i troškovi održavanja veći za opremu nego za građevine [20].

U termoelektranama pored stalnih troškova postoje i znatni promjenljivi troškovi. Kvota stalnih godišnjih troškova α_t termoelektrana je normalno veća od α_h, jer je udio opreme u termoelektrani veći nego u hidroelektranama. Osim toga investicije su praktički proporcionalne instaliranoj snazi termoelektrane P_{it} kad se radi o termoelektranama sličnih parametara pare i sličnih veličina agregata. Stalne troškove termoelektrane možemo, dakle, prikazati izrazom

$$K'_t = \alpha_t B_t P_{it} \tag{134}$$

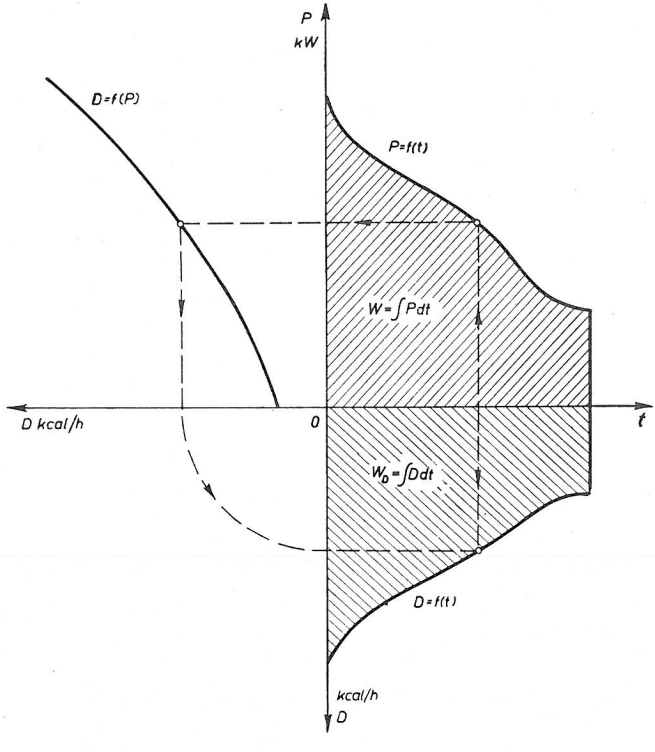
gdje su B_t specifične investicije po jedinici snage. Promjenljivi troškovi su proporcionalni utrošenoj količini goriva, odnosno količini topline koja je dovedena gorivom. Poznavajući energetsku karakteristiku termoelektrane i dijagram opterećenja (ili krivulju trajanja opterećenja) termoelektrane, ukupnu potrošnju topline W_D određujemo konstrukcijom prikazanom na sl. 48 [14]. Energetska karakteristika definirana je relacijom $D = f(P)$, gdje je D dovedena toplina u kcal/h, a P opterećenje. Ukupna potrošnja topline određena je izrazom

$$W_D = \int_0^t D\,dt \tag{135}$$

dok su promjenljivi troškovi

$$K''_t = c_W W_D \tag{136}$$

gdje je c_w cijena jedinice količine topline u gorivu.



Sl. 48. Određivanje potrošnje topline (W_D) u termoelektrani iz krivulje trajanja opterecenja $P = f(t)$, a pomoću energetske karakteristike $D = f(P)$.

Tako definirani promjenljivi troškovi nisu pogodni za analizu prilika u energetskom sistemu, pa se energetska karakteristika aproksimira pravcem (sl. 49). Tačnija aproksimacija (sl. 49a) uzima u obzir potrošak u praznom hodu D_o, pa je potrebna toplina za proizvodnju energije W

$$W_D = D_o T + s_d W \tag{137}$$

gdje je T broj sati trajanja pogona termoelektrane.

Za jednostavniju ali i manje tačnu aproksimaciju (sl. 49b), potrebna toplina određuje se iz izraza

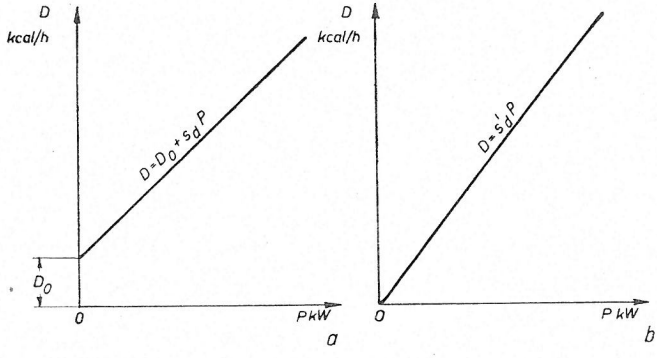
$$W_D = s'_d W \tag{138}$$

Veličina s_d (137) predstavlja prosječni dodatni potrošak (kcal/kWh), a s'_d (138) prosječni ukupni potrošak topline (kcal/kWh).

U oba slučaja promjenljivi troškovi se određuju prema (136).

Uzevši u obzir cijenu topline u gorivu c_w, a za aproksimaciju energetske karakteristike pravac (sl. 49 b), promjenljive troškove određujemo iz relacije

$$K''_t = k_b W \tag{139}$$



Sl. 49. Aproksimacije energetske karakteristike termoelektrane.

gdje je $k_b = c_w s'_d$.

U hidroelektranama, dakle, godišnji troškovi su praktički neovisni o proizvodnji, dok u termoelektranama značajan dio troškova ovisi o proizvodnji i o načinu korištenja postrojenja. To je glavna pogonsko-ekonomska razlika između hidroelektrana i termoelektrana, pa je radi te razlike i određen način eksploatacije tih dviju osnovnih vrsta elektrana.

Treba, međutim, naglasiti da iste energetsko-ekonomske karakteristike kao hidroelektrane imaju u pogledu troškova postrojenja koja kao pogonsko sredstvo koriste vjetar, te plimu i oseku, dok su nuklearne termoelektrane u mnogome slične ostalim termoelektranama.

TREĆE POGLAVLJE

SNAGA I ENERGIJA I ULOGA ELEKTRANA U ELEKTROENERGETSKOM SISTEMU

1. Elektroenergetski sistem termoelektrana

Da bi potrebe potrošača bile zadovoljene, elektrane treba da budu u mogućnosti da u promatranom vremenskom periodu proizvedu potrebnu energiju uz potrebnu snagu.

U elektroenergetskom sistemu, u kojem postoje samo termoelektrane, a uz pretpostavku — koja je u praksi uvijek ispunjenja — da na skladištu termoelektrana postoje dovoljne zalihe ugljena, potrebe potrošača bit će zadovoljene, ako je suma raspoloživih snaga termoelektrana ΣP_t veća ili upravo jednaka maksimalnom opterećenju P_{max} tokom promatranog vremenskog perioda. Dakle, potrebe će biti zadovoljene, kad je

$$\Sigma P_t \geqq P_{max} \tag{140}$$

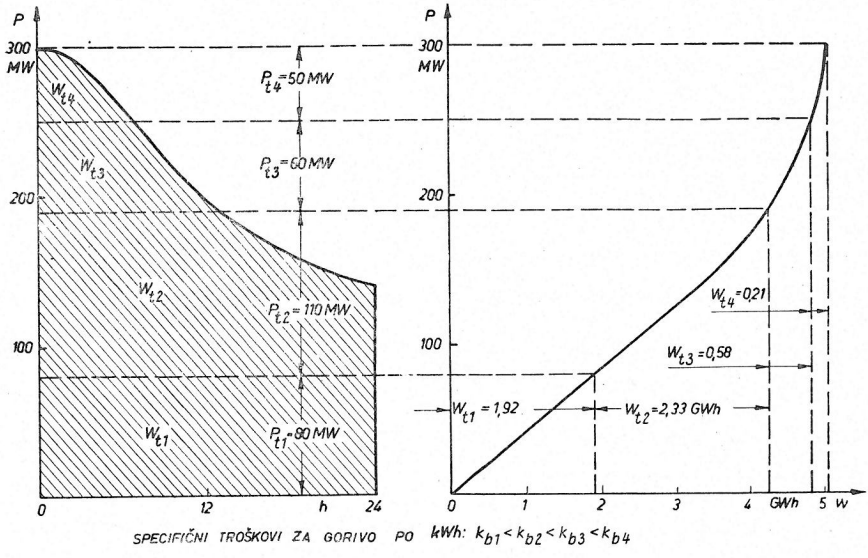
Naravno da obje veličine koje se uspoređuju treba promatrati na istom mjestu u mreži, na primjer, na pragu elektrana. Osim toga treba imati na umu da je suma raspoloživih snaga uvijek manja od sume maksimalnih snaga termoelektrana radi pregleda, popravaka i defekata. Uzevši u obzir potrebu pregleda i popravka, te mogućnost defekata, potrebna suma maksimalnih snaga elektrana prikazana je relacijom

$$\Sigma P_{t\,max} = \rho \Sigma P_t \tag{141}$$

gdje je ϱ faktor rezerve, a ΣP_t potrebna suma raspoloživih snaga termoelektrana.

Optimalnu raspodjelu opterećenja između elektrana i raspodjelu opterećenja među agregatima unutar elektrane možemo odrediti pomoću diferencijalnih troškova i diferencijalnih potrošaka, određenih na temelju što tačnijih energetskih karakteristika kako je to prikazano u [21], [22], [23] ili [24]. Takva raspodjela opterećenja neophodna je za elektroenergetski sistem, koji se već nalazi u pogonu, pa je od velikog značenja za dispečersku službu sistema i pogonsku upravu elektrana. Za analizu prilika u sistemu takva raspodjela opterećenja među elek-

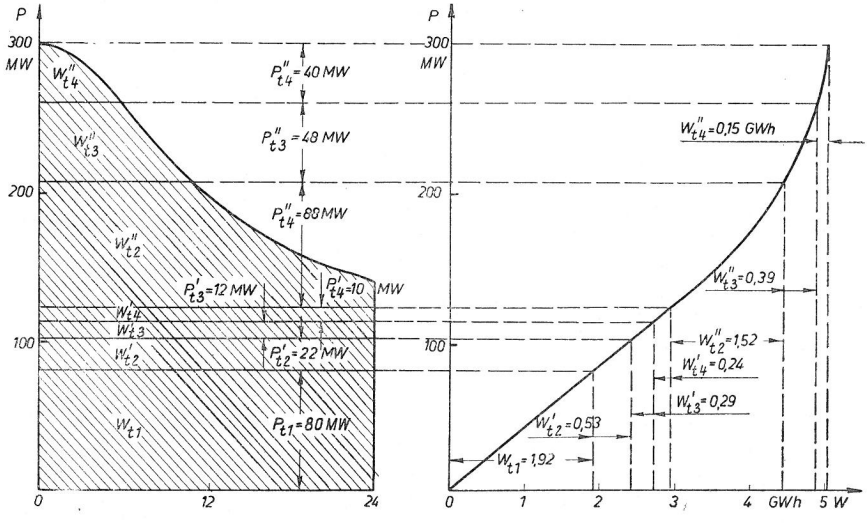
tranama nije pogodna, jer se radi o prilikama u budućnosti, pa nisu poznate tačnije energetske karakteristike većeg broja elektrana, a osim toga rad s tačnim energetskim karakteristikama doveo bi do vrlo kompliciranih računa, koji bi u krajnjoj liniji onemogućili svaku analizu. Radi toga normalno polazimo od aproksimacije prikazane na sl. 49 b, prema kojoj računamo sa srednjim specifičnim potroškom topline, odnosno sa srednjim specifičnim troškovima k_b po kWh. Uz takvu pretpostavku, položaj termoelektrana u dijagramu opterećenja, odnosno u krivulji trajanja opterećenja, određen je prema specifičnim troškovima u termoelektranama. U najniži dio dijagrama opterećenja postavlja se termoelektrana s najmanjim specifičnim troškovima, kako bi ta termoelektrana svojom raspoloživom snagom proizvela najveću moguću količinu energije. Iznad te termoelektrane postavljamo slijedeću s većim specifičnim troškovima, pa tako redom dok ne bude pokriven cijeli dijagram opterećenja.



Sl. 50. Smještaj termoelektrana u krivulji trajanja i u krivulji energija-snaga

Na sl. 50 prikazan je položaj četiri termoelektrane u dnevnoj krivulji trajanja opterećenja i krivulji energija-snaga. Njihov položaj je određen samo prema specifičnim troškovima za gorivo, a bez obzira na njihovu mogućnost prilagođavanja promjenama opterećenja. Međutim, normalno će biti da se u slučaju većeg specifičnog potroška radi o elektrani s nižim parametrima pare i agregatima manje snage, koji se lakše prilagođavaju promjenama opterećenja.

Osim toga, prilikom određivanja položaja elektrana na sl. 50 pretpostavljeno je da se termoelektrane 3 i 4 obustavljaju čim opterećenje padne toliko da njihova snaga više nije potrebna. Međutim, možemo zamisliti i takav slučaj da njihovo obustavljanje nije opravdano ni iz ekonomskih ni iz tehničkih razloga. Tada je potrebno predvidjeti da termoelektrane preko cijeloga dana ostanu u pogonu, ali da njihovo opterećenje ne padne ispod tehničkog minimuma (poglavlje II 5). Na sl. 51 prikazan je položaj termoelektrana uz pretpostavku da tehnički minimum iznosi 20% od potrebne snage.



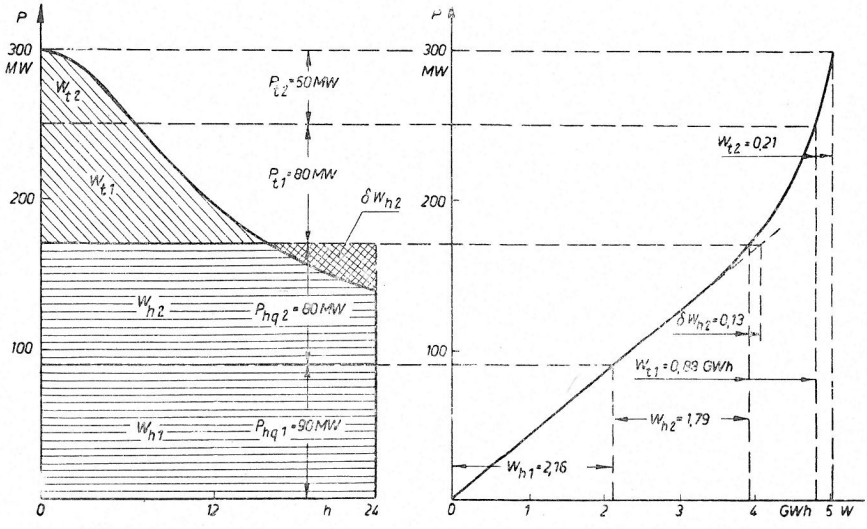
Sl. 51. Smještaj termoelektrana u krivulji trajanja i u krivulji energija-snaga uz pretpostavku da se termoelektrane ne obustavljaju preko noći.

2. Elektroenergetski sistem termoelektrana i protočnih hidroelektrana

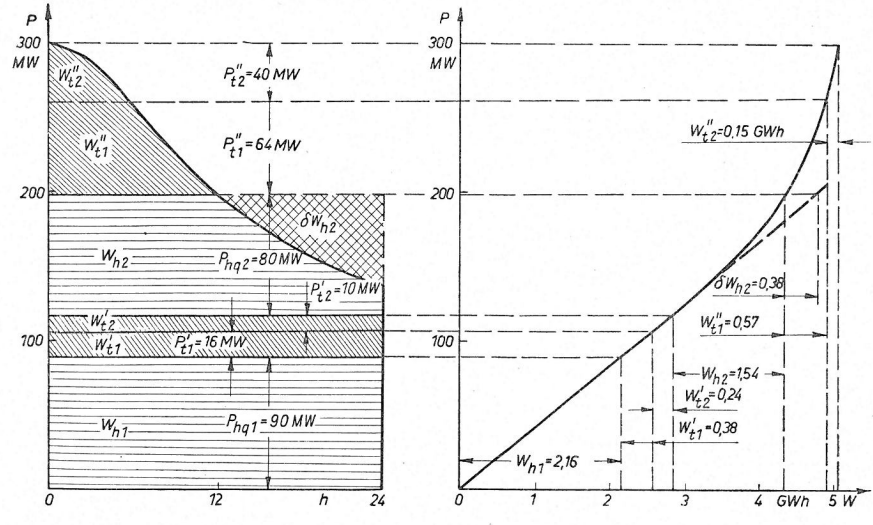
U protočnim hidroelektranama treba razlikovati raspoloživu snagu s obzirom na sposobnost agregata i cijelog postrojenja i raspoloživu snagu P_{hq} s obzirom na dotok. Za ocjenu mogućnosti zadovoljenja konzuma mjerodavna je snaga P_{hq} odnosno dotok hidroelektrani koji se može iskoristiti u turbinama, a ne njena maksimalna snaga, koju hidroelektrana može postići uz dotok koji je jednak ili veći od veličine izgradnje (poglavlje II 1). Budući da je moguća proizvodnja protočne hidroelektrane proporcionalna snazi P_{hq}, protočnu hidroelektranu možemo — s obzirom na mogućnost zadovoljenja potreba — smatrati termoelektranom raspoložive snage P_{hq}. Naravno da snaga P_{hq} ovisi o dotoku koji se mijenja, pa kad se govori o toj snazi treba

imati na umu da se radi o snazi za onaj dotok koji u času promatranje dotječe elektrani. Prema tome je nužan i dovoljan uvjet za zadovoljenja potreba

$$\Sigma P_{hq} + \Sigma P_t \geqq P_{\max} \tag{142}$$



Sl. 52. Smještaj protočnih hidroelektrana i termoelektrana u krivulji trajanja i u krivulji energija-snaga.



Sl. 53. Smještaj protočnih hidroelektrana i termoelektrana u krivulji trajanja i u krivulji energija-snaga uz pretpostavku da se termoelektrane ne obustavljaju preko noći

S obzirom na položaj protočne hidroelektrane u dijagramu, možemo smatrati da se radi o termoelektrani s raspoloživom snagom P_{hq} i specifičnim promjenljivim troškovima $k_b = 0$. Odatle i zahtjev da se protočna hidroelektrana smjesti u najniži dio dijagrama opterećenja (sl. 52). Ako je $\Sigma P_{hq} > P_{\min}$, imat ćemo preljev u hidroelektranama. Promatrano s ekonomskog stanovišta, sasvim je svejedno u kojoj će se hidroelektrani voda prelijevati, odnosno sasvim je svejedno kako će se preljev podijeliti među hidroelektranama.

Ako pretpostavimo da se — iz bilo kojih razloga — termoelektrane ne obustavljaju preko noći, smještaj elektrana prikazan je na sl. 53. Sada će doći do preljeva, ako je $\Sigma P_{hq} + \Sigma P_{t\min} > P_{\min}$, gdje je $P_{t\min}$ tehnički minimum termoelektrane.

3. Elektroenergetski sistem termoelektrana i akumulacionih hidroelektrana

Za razliku od protočne hidroelektrane, koja može proizvesti snagu koja odgovara protoku i padu u promatranom času, akumulaciona hidroelektrana može uvijek proizvesti maksimalnu snagu koja odgovara padu u promatranom momentu, ali bez obzira na dotok u akumulacioni bazen. S tim, međutim, nije kazano koliko dugo može akumulaciona hidroelektrana raditi s maksimalnim opterećenjem, jer to ovisi o veličini akumulacionog bazena, o dotoku u akumulacioni bazen i o potrebnoj proizvodnji akumulacione hidroelektrane u razdoblju nakon promatranog. Radi toga u elektroenergetskom sistemu u kojem rade i akumulacione hidroelektrane nije za zadovoljenje potreba dovoljan uvjet

$$\Sigma P_{hq} + \Sigma P_t + \Sigma P_{ha\max} \geqq P_{\max} \tag{143}$$

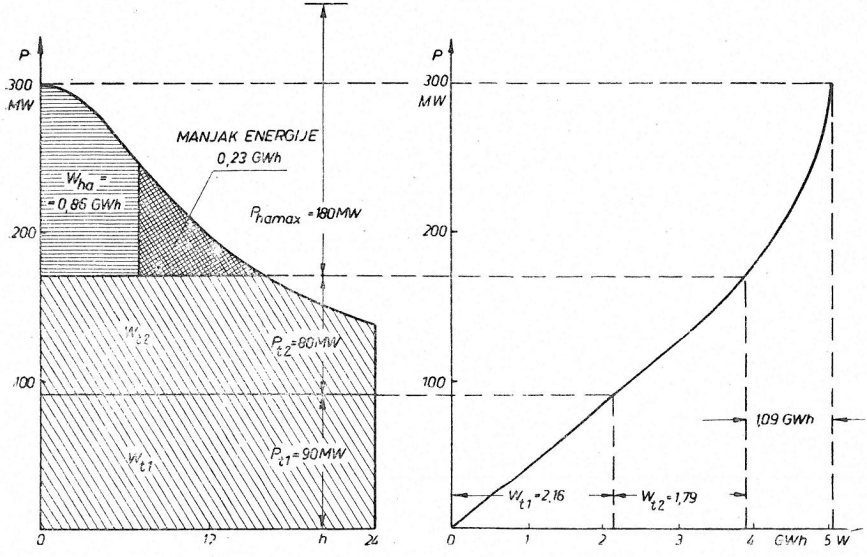
gdje je $P_{ha\max}$ maksimalna snaga akumulacione hidroelektrane. Međutim, uvjet (143) je nužan, jer ako taj uvjet nije ispunjen ne može biti govora o zadovoljenju potreba. Dakle, pored uvjeta (143) mora biti ispunjen i uvjet koji može biti formuliran na slijedeći način

$$\Sigma W_{hq} + \Sigma W_t + \Sigma W_{ha} \geqq W_d \tag{144}$$

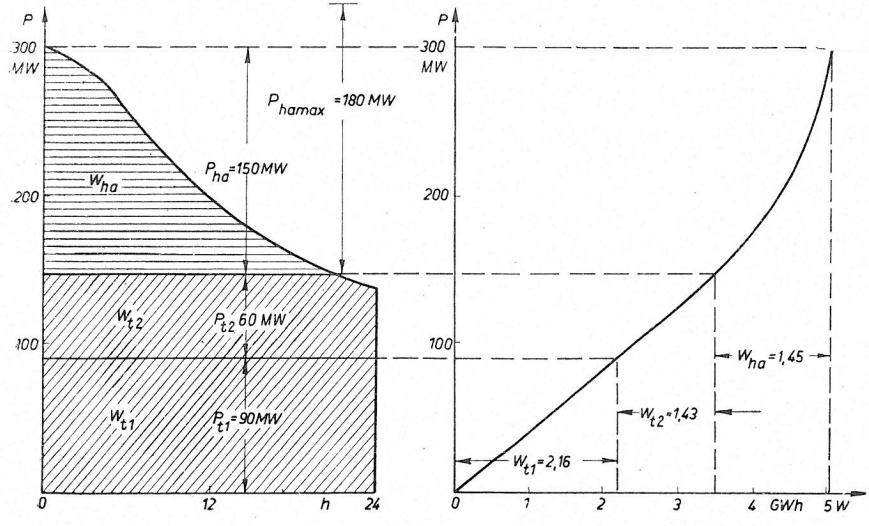
U (144) W_{hq}, W_t, W_{ha} predstavljaju proizvodnju protočne hidroelektrane, proizvodnju termoelektrane i proizvodnju akumulacione hidroelektrane, koje se mogu iskoristiti za pokrivanje potreba uzevši u obzir oblik dijagrama opterećenja.

Promotrimo slučaj kad je ispunjen uvjet (143), ali nije ispunjen uvjet (144), a da prikaz bude što jednostavniji predpostavimo da postoje dvije termoelektrane i samo jedna akumulaciona hidroelektrana. U primjeru na sl. 54 prikazan je slučaj kad je raspoloživa snaga termoelektrana $P_t = 170$ MW, a maksimalna snaga akumulacione hidro-

elektrane $P_{ha\,max} = 180$ MW, pa je raspoloživa snaga elektrana veća od maksimalnog opterećenja, koje iznosi 300 MW. Akumulaciona hidroelektrana može proizvesti 0,86 GWh. Termoelektrane svojom snagom mogu maksimalno proizvesti 3,95 GWh (uzevši u obzir oblik



Sl. 54. Smještaj akumulacione hidroelektrane s nedovoljnom mogućom proizvodnjom i termoelektrana u krivulji trajanja i u krivulji energija-snaga.



Sl. 55. Smještaj akumulacione hidroelektrane s malom ili dovoljnom mogućom proizvodnjom i termoelektrana u krivulji trajanja i u krivulji energija-snaga.

dijagrama opterećenja), pa je ukupna moguća proizvodnja 4,81 GWh, dok su ukupne potrebe 5,04 GWh. Prema tome, i pored toga što je zbroj snaga elektrana veći od maksimalnog opterećenja, nije moguće zadovoljiti potrebe.

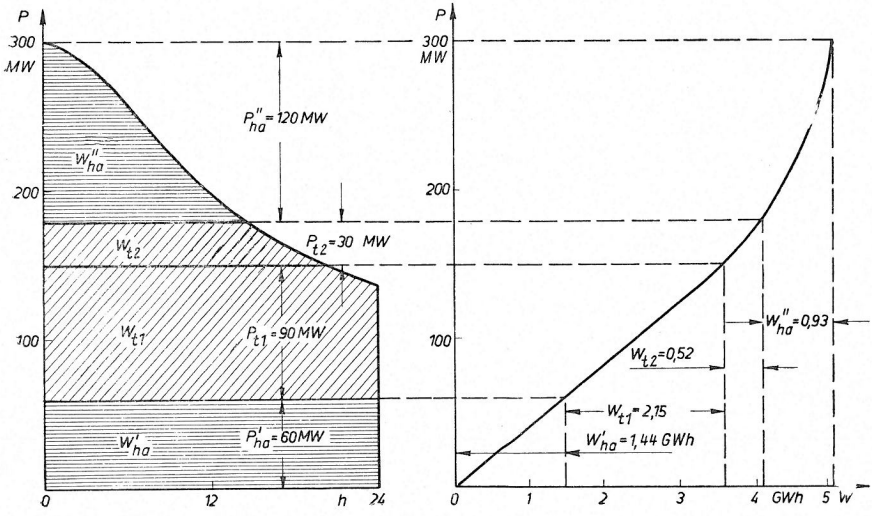
Potrebe će, dakle, biti zadovoljene kad moguća proizvodnja akumulacione hidroelektrane bude jednaka ili veća od 1,09 GWh. Pogledajmo sada kakve ćemo prilike imati kad je moguća proizvodnja malena, ali veća od 1,09 GWh (sl. 55). Akumulaciona hidroelektrana je smještena u najviši dio dijagrama, ali se i pored toga ne može opteretiti do maksimalne snage, pa u primjeru na sl. 55 ostaje neiskorištenih 30 MW. U ovom slučaju upravo postoji jednakost lijeve i desne strane izraza (144), dok je zadovoljena nejednadžba (143).

Sva moguća proizvodnja akumulacione hidroelektrane može se u našem primjeru smjestiti u vrh dijagrama opterećenja, ako je moguća proizvodnja manja ili jednaka 2,16 GWh. Ako je $W_{ha} = 2{,}16$ GWh, hidroelektrana se može opteretiti do pune snage. Takvo rješenje predstavlja ujedno i optimalno rješenje, jer je na taj način potrebno angažirati najmanju moguću snagu iz termoelektrane, a to znači da nije potrebno staviti u pogon neke od manje ekonomičnih termoelektrana ili neke od manje ekonomičnih turboagregata, koje bi bilo potrebno angažirati kad ne bismo koristili najveću snagu hidroelektrana, koju još možemo koristiti.

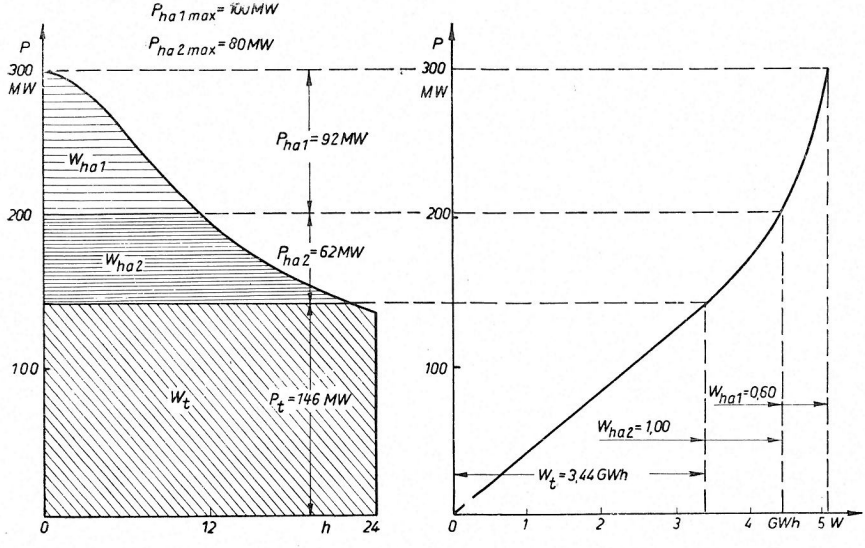
Ako je, međutim, moguća proizvodnja akumulacione hidroelektrane — u našem primjeru — veća od 2,16 GWh, nije moguće hidroelektranom pokriti cijeli varijabilni dio dijagrama, a da ne dođe do gubitka vode. Neka je, na primjer, moguća proizvodnja akumulacione hidroelektrane 2,37 GWh. Za varijabilni dio potrebna je snaga od 160 MW i energija od 1,68 GWh. Preostaje, dakle 0,69 GWh, koju je energiju u konstantnom dijelu dijagrama moguće proizvesti snagom od 28,7 MW, koja, međutim, ne stoji na raspolaganju, jer je maksimalna snaga hidroelektrane 180 MW, a 160 MW je angažirano u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja. Radi toga bi dio energije iz hidroelektrane ostao neiskorišten. Da bi se postigao optimalni smještaj hidroenergije treba podijeliti moguću proizvodnju na varijabilni i konstantni dio dijagrama opterećenja tako da se omogući iskorištenje raspoložive vode i da se iskoristi maksimalna snaga hidroelektrane. Takav smejštaj za moguću proizvodnju od 2,37 GWh prikazan je na sl. 56.

S povećanjem moguće proizvodnje akumulacione hidroelektrane sve veći dio dolazi u konstantni dio dijagrama opterećenja, a termoelektrane se pomiču u sve viši dio dijagrama, da bi, u slučaju kad moguća proizvodnja postane jednaka maksimalno mogućoj proizvodnji, akumulaciona hidroelektrana — s obzirom na smještaj u dijagramu opterećenja — postala jednaka protočnoj hidroelektrani. Takav slučaj može nastupiti kad je akumulacija puna, a dotok jednak ili veći od veličine izgradnje, ili kad je — radi zadovoljenja potreba — potrebno da akumulaciona hidroelektrana proizvodi što više.

Kad u sistemu postoji više akumulacionih hidroelektrana, njihov smještaj treba tako odabrati da se postigne što veće — a po mogućnosti i potpuno — iskorištenje raspoložive vode uz što je moguće veću snagu iz hidroelektrana. To će biti postignuto ako u najviši dio dijagrama smjestimo hidroelektranu koja ima najmanju relativnu

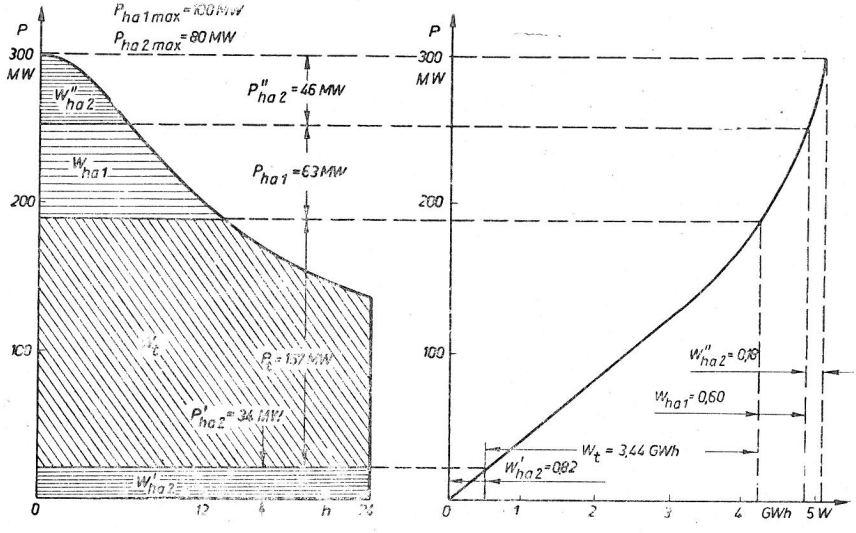


Sl. 56. Smještaj akumulacione hidroelektrane, s mogućom proizvodnjom koja se ne može smjestiti u vrh dijagrama opterećenja, i termoelektrana u krivulji trajanja i u krivulji energija-snaga.



Sl. 5c. Smještaj dviju akumulacionih hidroelektrana u krivulji trajanja i u krivulji energija-snaga (Alternativa: hidroelektrana 1 u vrhu dijagrama).

moguću proizvodnju, a ispod nje hidroelektranu sa slijedećom većom relativnom proizvodnjom itd. Pod relativnom proizvodnjom razumijevamo omjer između moguće proizvodnje (W_{ha}) i maksimalno moguće proizvodnje (24 $P_{ha\,\max}$) akumulacione hidroelektrane. Da se ukaže na razliku, koja nastaje ako se odstupi od gore navedenog pravila, pretpostavljeno je da postoje dvije akumulacione hidroelektrane, od kojih prva ima maksimalnu snagu od 100 MW i moguću proizvodnju u promatranom danu od 0,60 GWh, a druga 80 MW i 1,00 GWh. Prva, prema tome, ima manju relativnu moguću proizvodnju od druge. Na sl. 57 prikazan je slučaj kad je u najviši dio dijagrama smještena prva, a na sl. 58 slučaj kad je u najviši dio dijagrama smještena druga hidroelektrana. U prvom slučaju potrebna je manja snaga iz termoelektrana uz istu proizvodnju, nego drugom slučaju.

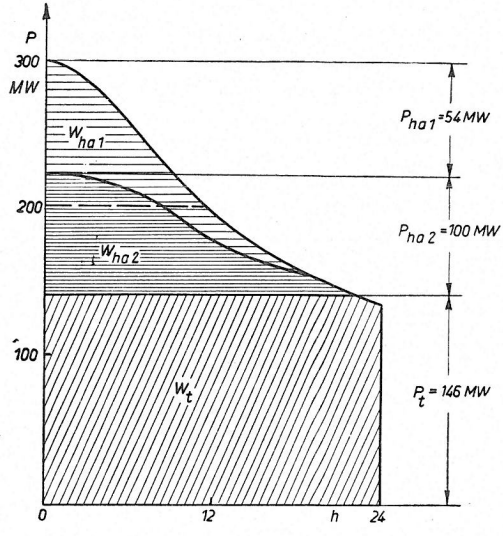


Sl. 58. Smještaj dviju akumulacionih hidroelektrana u krivulji trajanja i u krivulji energija-snaga (Alternativa: hidroelektrana 2 u vrhu dijagrama).

4. Napomene uz prikazanu ulogu elektrana

Prilikom prikaza uloge elektrana pretpostavljeno je uvijek da elektrana pokriva dio dijagrama opterećenja između dva horizontalna pravca. Takva pretpostavka bit će normalno ispunjena za protočne hidroelektrane, jer se samo na taj način može maksimalno iskoristiti raspoloživa voda. Za akumulacione hidroelektrane takva pretpostavka predstavlja samo aproksimaciju, koja omogućuje jednostavno računanje, jer ni s obzirom na snagu ni s obzirom na moguću proizvodnju nije neophodno da se akumulaciona hidroelektrana smjesti među dva

horizontalna pravca. Nema, na primjer, nikakve poteškoće da dvije razmatrane akumulacione hidroelektrane mjesto prema sl. 57 budu angažirane na način kako je prikazano na sl. 59, jer u oba slučaja maksimalno opterećenje hidroelektrana ne prelazi maksimalnu snagu hidroelektrane, dok su proizvodnje u oba slučaja međusobno jednake. Najpovoljnija podjela opterećenja među akumulacionim hidroelektranama ovisi o položaju hidroelektrana prema konzumu, o optimalnoj raspodjeli opterećenja među hidroelektranama, postavivši zahtjev da se iz raspoložive količine vode proizvede što veća količina energije [23].



Sl. 59. Jedan od mogućih smještaja dviju akumulacionih hidroelektrana u krivulji trajanja (alternativni smještaj na sl.57).

Da bi se proizvela što je moguće veća količina energije sa što manjom angažiranom snagom termoelektrana, najpovoljnije je da se ukupna proizvodnja termoelektrana smjesti između dva horizontalna pravca. Dakle, ako postoji manjak energije, treba tako i postupiti. Kako, međutim, treba podijeliti opterećenje među samim termoelektranama ovisi o tačnijim energetskim karakteristikama, odnosno o diferencijalnom potrošku termoelektrana i pojedinih agregata [21].

Prikazani način određivanja položaja elektrana predstavlja, dakle, aproksimativno određivanje uloge pojedinih elektrana, a može poslužiti i za analize mogućnosti zadovoljenja potreba raspoloživom snagom i energijom hidroelektrana i raspoloživom snagom termoelektrana.

ČETVRTO POGLAVLJE

ISKORIŠTENJE RASPOLOŽIVE SNAGE I ENERGIJE IZ HIDROELEKTRANA I ODREĐIVANJE POTREBNE SNAGE I PROIZVODNJE TERMOELEKTRANA

1. Potreba analize

U elektroenergetskom sistemu u kojem rade hidroelektrane i termoelektrane potrebno je analizirati prilike, kako bi se utvrdilo koliki se dio raspoložive energije i snage hidroelektrana može iskoristiti, kolika je potrebna snaga i proizvodnja termoelektrana za dopunu hidroelektrana, kakva je uloga termoelektrana, te da li je moguće predviđenim elektranama zadovoljiti potrebe. Takva analiza je potrebna da bi se došlo do podataka za energetsko-ekonomska razmatranja i do što tačnijih saznanja o prilikama u elektroenergetskom sistemu. Posebno nas interesira kakvi će odnosi vladati u daljnjem razvoju, kako bismo mogli donijeti pravovremene odluke o gradnji novih postrojenja, o karakteristikama novih elektrana, o mogućnostima zadovoljenja potreba, o troškovima koje treba očekivati i slično.

U sistemu u kojem postoje samo termoelektrane normalno nije potrebna neka detaljnija analiza u takvom opsegu kao za slučaj kad pored termoelektrana postoje i hidroelektrane, a pogotovo ako hidroelektrane imaju značajan udio u ukupnoj proizvodnji. Kad postoje i termoelektrane i hidroelektrane (danas se, naime, normalno grade hidroelektrane tako da imaju makar i mali akumulacioni bazen) potrebno je analizirati i mogućnost zadovoljenja potreba i snagom i energijom, jer — kako je pokazano u prethodnom poglavlju — moraju biti zadovoljeni uvjeti (143) i (144).

U daljnjem izlaganju prikazat će se dvije metode. Prva se može upotrijebiti za manje, a druga i za manje i za veće elektroenergetske sisteme.

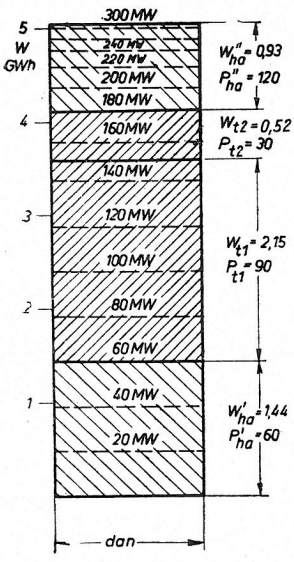
2. Metoda konzumnog okvira

a) Popunjavanje dnevnog konzumnog okvira

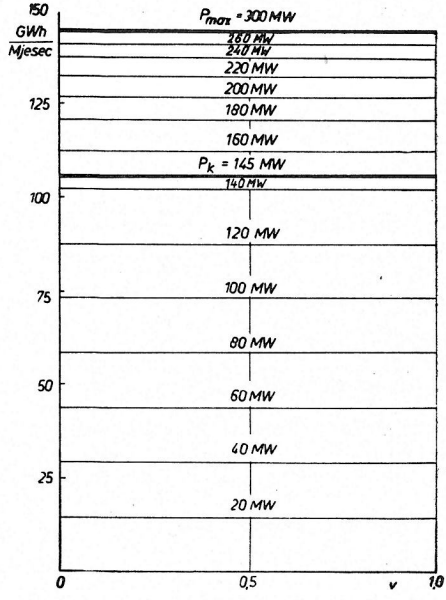
Konzumni okvir konstruiramo iz krivulje energija-snaga kako je već pokazano na sl. 9. Popunjavanje konzumnog okvira energijom

vrši se na isti način kao i određivanje uloge elektrana, koje je prikazano u poglavlju III. Razlika je, međutim, samo u prikazivanju elektrana u dijagramu opterećenja, jer su u konzumnom okviru i snage i energije prikazane dužinama.

Na sl. 60 prikazan je konzumni okvir koji odgovara krivulji trajanja opterećenja i krivulji energija-snaga koje su upotrebljene



Sl. 60. Primjer popunjenog konzumnog okvira. Položaj elektrana odgovara primjeru na sl. 56.



Sl. 61. Primjer mjesečnog konzumnog okvira

za ilustraciju primjera poglavlja III. Na istoj slici ucrtan je i položaj elektrana koji odgovara primjeru na sl. 56.

Ako nacrtamo jedan do drugoga dnevne konzumne okvire cijele godine i popunimo ih za svaki dan posebno, uzevši u obzir raspoložive snage i energije elektrana, moći ćemo na jednom dijagramu prikazati prilike u godini. Naravno da u tom slučaju treba uzeti u obzir hidrološke podatke jedne konkretne godine, dok bismo za drugu godinu postupak mogli ponoviti i na taj način utvrditi prilike za niz hidroloških godina.

b) Popunjavanje mjesečnog konzumnog okvira

Rad sa dnevnim konzumnim okvirima je dugotrajan, pogotovo ako se želi odrediti prilike u nizu godina, pa je radi toga povoljno

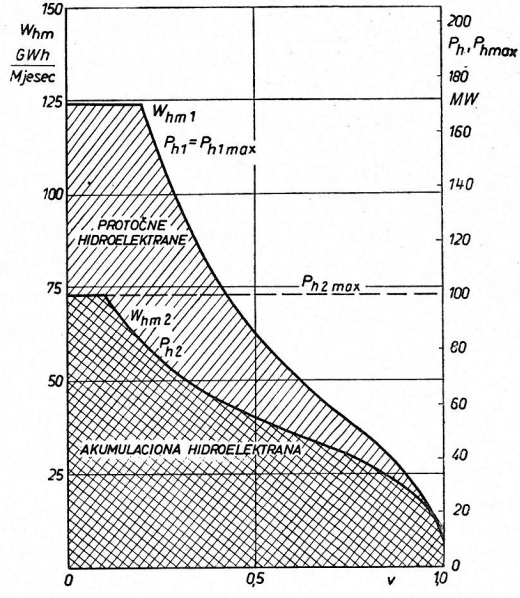
preći na mjesečne konzumne okvire. Tada polazimo od mjesečne krivulje trajanja opterećenja, na primjer prema aproksimaciji prikazanoj na sl. 10, i od krivulje vjerojatnosti protoka u hidroelektranama na temelju kojih se mogu odrediti krivulje vjerojatnosti srednjih i maksimalnih snaga, odnosno krivulje vjerojatnosti moguće proizvodnje i maksimalnih snaga hidroelektrana. Popunjavanjem konzumnog okvira za niz stanja dobit ćemo u konzumnom okviru položaje pojedinih elektrana za određene situacije, što će omogućiti da se odrede situacije koje se mogu očekivati u promatranom mjesecu.

Možda je najjednostavnije da se to ilustrira primjerom. Pretpostavimo da se radi o mjesečnoj krivulji trajanja opterećenja sa slijedećim karakteristikama: maksimalno opterećenje $P_{\max} = 300$ MW, konstantno opterećenje $P_{mk} = 145$ MW, trajanje razdoblja velikih opterećenja u radnom danu $t_v = 18$ sati, omjeri $\alpha = 0{,}286$ i $\beta = 0{,}832$, broj radnih dana u mjesecu $r = 25$ dana, a broj sati u mjesecu $24\,(r + n) = 730$ sati. Iz tih podataka, a prema poglavlju I 2c određujemo krivulju energija-snaga, pomoću koje, na način opisan u poglavlju I 1e, konstruiramo konzumni okvir za promatrani mjesec (sl. 61). Na apscisi su nanijete vjerojatnosti (v), pa prikazani konzumni okvir pokazuje da će se za bilo kakve hidrološke prilike u tom mjesecu pojavljivati isti dijagram opterećenja.

Za popunjavanje zadanog konzumnog okvira stoje na raspolaganju protočne hidroelektrane (HE 1), akumulaciona hidroelektrana (HE 2), koja ima dnevni akumulacioni bazen koji po svojoj energetskoj vrijednosti zadovoljava nejednadžbu (82), i termoelektrane potrebne snage. Mogućnost proizvodnje hidroelektrana zadana je krivuljama vjerojatnosti (sl. 62) i to posebno za sve protočne hidroelektrane, a posebno za akumulacionu hidroelektranu. Prilikom crtanja krivulja vjerojatnosti vođeno je računa i o istodobnosti pojava, pa se moguće proizvodnje koje se pojavljuju s istom vjerojatnošću, pojavljuju i u istom momentu. U našem slučaju se, dakle, radi o hidroelektranama s istim ili vrlo sličnim hidrološkim karakteristikama. Nema, međutim, poteškoća da se pođe od krivulje vjerojatnosti, na primjer, protočnih hidroelektrana, te da se — uzimajući u obzir istodobnost pojava — nacrta krivulja moguće proizvodnje akumulacione hidroelektrane, koja i ne bi morala biti opadajuća krivulja, već bi mogla imati i skokove proizvodnje. Naravno da se u tom slučaju ne bi radilo o krivulji vjerojatnosti za promatranu akumulacionu hidroelektranu. Na sl. 62 krivulje pretstavljaju istodobno i moguću proizvodnju i u srednju snagu (u drugom mjerilu), a krivulja za protočne hidroelektrane ujedno i maksimalnu snagu. Za akumulacionu hidroelektranu je pretpostavljeno, da u svim slučajevima ima istu maksimalnu snagu, jer je računato da su promjene pada u ovisnosti o dotoku i stanju u akumulaciji zanemarivo malene.

Na sl. 63 prikazan je popunjeni konzumni okvir. Prilikom popunjavanja moglo se ustanoviti da se može razlikovati pet slučajeva (A, B, C, D i E). U slučaju velikih voda (slučaj A) ne može se iskoristiti

sva voda ni u protočnim ni u akumulacionoj hidroelektrani, a maksimalno opterećenje je veće od zbroja maksimalnih snaga hidroelektrana. Da bi se postiglo što bolje iskorištenje vode, termoelektrane su postavljene u vrh dijagrama sa snagom koja nedostaje nakon angažiranja maksimalnih snaga hidroelektrana. Za slučaj B imamo sličnu situaciju kao u slučaju A, ali s tom razlikom da je dotok protočnim hidroelektranama manji od njihovih veličina izgradnje, pa je i raspoloživa snaga protočnih hidroelektrana manja nego u slučaju A. Međutim, raspoloživa snaga protočnih hidroelektrana je još veća od konstantnog

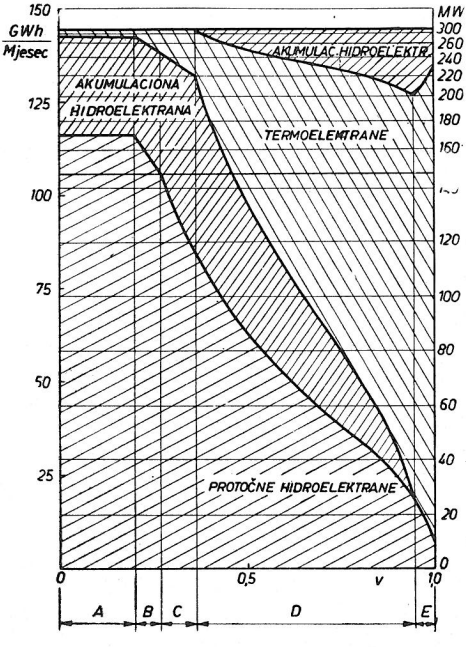


Sl. 62. Mogućnost mjesečne proizvodnje protočnih (W_{hm_1}) i akumulacione hidroelektrane (W_{hm_2}), te srednjih (P_{h1} i P_{h2}) i maksimalnih snaga ($P_{h\max 1}$ i $P_{h\max 2}$) u promatranom mjesecu. Prikaz pomoću krivulja vjerojatnosti.

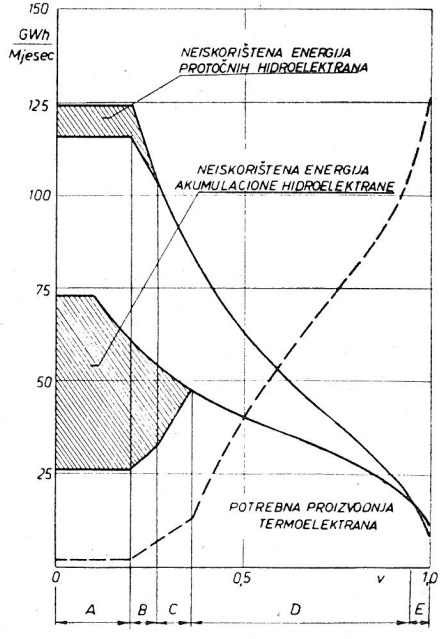
opterećenja, pa radi toga još uvijek dolazi do preljeva. Postavljanjem akumulacione hidroelektrane iznad protočnih i koristeći maksimalnu snagu akumulacione hidroelektrane, ne može se iskoristiti sva voda koja dotječe akumulacionoj hidroelektrani (sl. 64). Potrebna snaga iz termoelektrana je sada povećana zbog smanjenja raspoložive snage iz protočnih hidroelektrana (sl. 65).

U slučaju C sva moguća proizvodnja protočnih hidroelektrana može se iskoristiti, jer je njihova snaga manja od konstantnog opte-

rećenja, ali se istodobno ne može iskoristiti sva voda koja dotječe u akumulacionu hidroelektranu. Potrebna snaga iz termoelektrana dalje raste radi smanjenja raspoložive snage iz protočnih hidroelektrana.



Sl. 63. Popunjeni konzumni okvir proizvodnjom elektrana prikazanom na sl. 62.



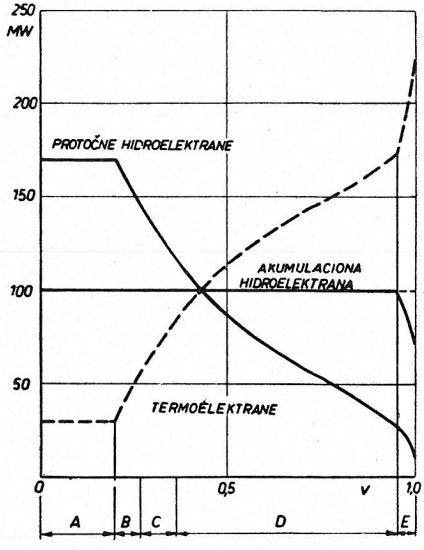
Sl. 64. Iskorištena i neiskorištena energija hidroelektrana i potrebna proizvodnja termoelektrana za popunjavanje konzumnog okvira prema sl. 63.

Sada, kao i u slučajevima A i B, termoelektrane pokrivaju najviši dio dijagrama opterećenja.

U slučaju D nestaje preljeva (sl. 64), a akumulaciona hidroelektrana prelazi sve više u vrh dijagrama opterećenja. Sada joj je moguće dati i tu ulogu, jer se njena moguća proizvodnja smanjila. Dio proizvodnje akumulacione hidroelektrane smješten je u konstantni dio dijagrama opterećenja. Takvu situaciju imamo sve dok moguća proizvodnja akumulacione hidroelektrane ne postane tako mala da se s njenom maksimalnom snagom može smjestiti u vrh dijagrama, kada nastupa slučaj E. Tada je sva moguća proizvodnja akumulacione hidroelektrane u vrhu dijagrama, a sva snaga akumulacione hidroelektrane ne može se ni iskoristiti (sl. 65), zbog čega dolazi do naglog povišenja potrebne snage iz termoelektrana.

Kao što je već spomenuto, iz prikaza u konzumnom okviru (sl. 63) vidljiva je i proizvodnja elektrana, kao i korištenje odnosno angažiranje njihovih snaga, ali je radi bolje ilustracije na sl. 64 prikazana proizvodnja, a na sl. 65 korištenje snaga hidroelektrana i potrebna snaga termoelektrana.

Prilikom popunjavanja konzumnog okvira na sl. 63 pretpostavljeno je da se termoelektrane obustavljaju preko noći. Međutim, nema principijelnih poteškoća da se ispuni konzumni okvir, ako ne



Sl. 65. Angažiranje snage hidroelektrana i termoelektrana za popunjavanje konzumnog okvira prema sl. 63.

računamo s obustavljanjem termoelektrana, ali je u tom slučaju potrebno računati s tehničkim minimumom u onim razdobljima kada termoelektrane u konstantnom dijelu dijagrama nisu potrebne za zadovoljenje konzuma, pa ih sa snagom koja odgovara tehničkom minimumu treba smjestiti u konstantni dio dijagrama opterećenja.

U prikazanom primjeru promatrano je više protočnih hidroelektrana zajedno, što se može uvijek učiniti, ali je pretpostavljeno da postoji samo jedna akumulaciona hidroelektrana. Treba, naime, naglasiti da je moguće sve protočne hidroelektrane promatrati kao jednu hidroelektranu, jer kod njih postoji proporcionalnost između raspoložive snage i moguće proizvodnje, dok akumulacione hidroelektrane treba promatrati svaku posebno, jer njihov položaj u dija-

gramu opterećenja — ako želimo postići što bolje iskorištenje vode i snage — ovisi o omjeru moguće proizvodnje i maksimalne snage (poglavlje III 3) za svaku pojedinu hidroelektranu.

U primjeru na sl. 63 računato je da u akumulacionoj hidroelektrani dolazi do većih preljeva nego u protočnim hidroelektranama. Račun se bez poteškoća mogao provesti i uz obrnutu pretpostavku, ali to ne bi dovelo ni do kakve promjene u odnosu na potrebno angažiranje termoelektrana. Budući da se u našem primjeru radi o hidroelektrani s dnevnom akumulacijom, nema nikakve razlike u tome da li se preljevi pojavljuju u protočnim ili u akumulacionoj hidroelektrani. Međutim, kad bi se radilo o hidroelektrani sa sezonskom akumulacijom smještaj hidroelektrana, ako je prikazan na sl. 63, imao bi nesumnjive prednosti.

Konačno treba naglasiti da se prilikom popunjavanja mjesečnog konzumnog okvira promatra niz situacija koje prikazuju sva stanja do kojih može doći, ali se stvarno svako stanje posebno razmatra. Pri razmatranju svakog stanja pretpostavlja se da su protoci u hidroelektranama konstantni tokom tjedna, što predstavlja ciklus opterećenja, jer je — uz pojednostavljenja navedena u poglavlju I 2a — na osnovu tjednog ciklusa i konstruirana mjesečna krivulja trajanja opterećenja, pa prema tome i mjesečni konzumni okvir. Ta pretpostavka dovodi do grešaka u periodu malih voda, ali su te greške male, jer je promjena protoka u periodu malih voda vrlo polagana.

3. Metoda konstantne i varijabilne energije

a) Općenito

S obzirom na činjenicu da—prilikom upotrebe konzumnog okvira — svaku od akumulacionih hidroelektrana treba promatrati posebno, metoda konzumnog okvira nije pogodna za upotrebu kad se radi o većem broju akumulacionih hidroelektrana, što je slučaj u svakom nešto većem elektroenergetskom sistemu u kojem proizvodnju hidroelektrana ne možemo zanemariti, pogotovo iz razloga što su rijetke hidroelektrane bez ikakove mogućnosti akumuliranja vode. Radi toga je za analizu prilika u elektroenergetskom sistemu s više akumulacionih hidroelektrana korisno upotrijebiti metodu konstantne i varijabilne energije.

Za takvu analizu je potrebno poznavati tri veličine za definiranje potreba: potrebnu varijabilnu energiju (W_{mv}), varijabilno opterećenje (P_{mv}) i potrebnu konstantnu energiju (W_{mk}). Svi navedeni podaci odnose se na mjesec, jer mjesečne analize imaju najčešću primjenu u praksi, ali se ništa bitno ne bi izmijenilo da se analiza provede za tjedan ili za radni dan. Konstantno opterećenje (P_{mk}) nije potrebno posebno zadati, jer je ono određeno potrebnom konstantnom energijom prema relaciji (24).

S druge strane, da bi se definirala mogućnost proizvodnje hidroelektrana, potrebno je poznavati: moguću proizvodnju varijabilne energije (W_{hv}), varijabilnu snagu (P_{hv}) i proizvodnju konstantne energije (W_{hk}). Ni sada nije potrebno posebno zadati konstantnu snagu (P_{hk}), jer i sada vrijedi relacija analogna izrazu (24).

Ako pretpostavimo da postoje slijedeće jednakosti:

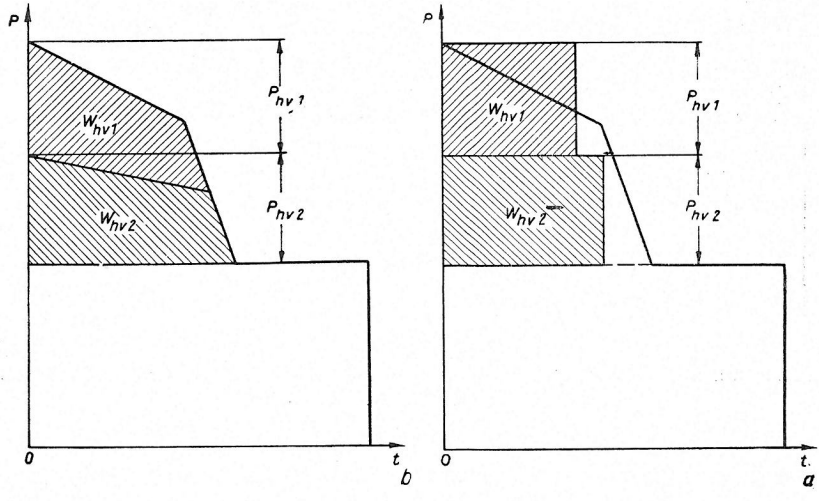
$$W_{mv} = W_{hv} \tag{145}$$

$$P_{mv} = P_{hv} \tag{146}$$

$$W_{mk} = W_{hk} \tag{147}$$

postavlja se pitanje da li je u tom slučaju zadovoljena potražnja i energije i snage.

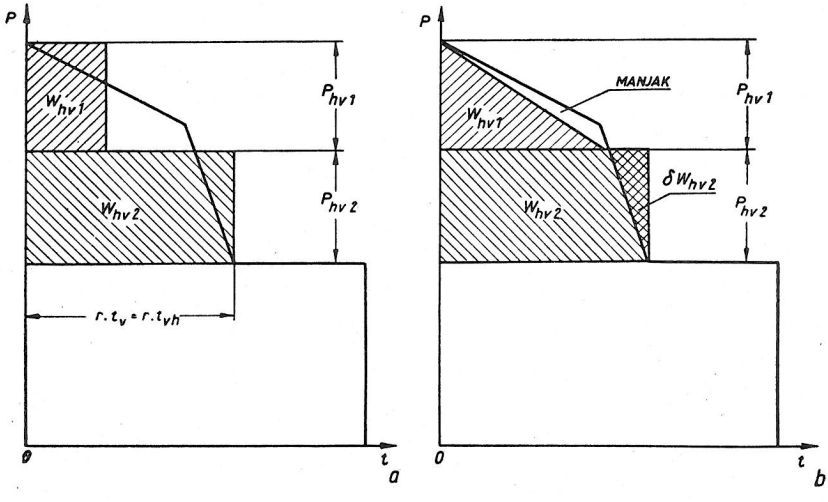
Očigledno da ne treba dokazivati da je jednadžba (147) potreban i dovoljan uvjet za zadovoljenje potreba energije i snage, jer se radi i o opterećenju i o proizvodnji s konstantnom snagom.



Sl. 66. Primjer mogućnosti zadovoljenja potreba varijabilne energije proizvodnjom dviju hidroelektrana za slučaj kad je $W_{mv} = W_{hv1} + W_{hv2}$.

Međutim, mogućnost zadovoljenja potreba, kad su ispunjene jednadžbe (145) i (146), treba detaljnije razmotriti. Pretpostavimo da su potrebe prikazane krivuljom trajanja na sl. 66, te da su moguće proizvodnje varijabilne energije dviju akumulacionih hidroelektrana prikazane pravokutnicima na sl. 66a. Prikaz moguće proizvodnje varijabilne energije pravokutnicima osniva se na razmatranju u po-

glavlju II 3b, jer je tamo pretpostavljena maksimalna moguća vremenska koncentracija proizvodnje hidroelektrana, što ujedno predstavlja i najteži slučaj s obzirom na korištenje akumulacije. Nema, međutim, zapreke da se način korištenja moguće proizvodnje varijabilne energije prilagodi potrebama, kako je to, na primjer, prikazano na sl. 24 i 25. Pri tome treba da budu ispunjena dva uvjeta: maksimalno opterećenje novog dijagrama opterećenja ne smije biti veće od maksimalne varijabilne snage hidroelektrane, te površina novog dijagrama ne smije biti veća od osnovnog pravokutnog dijagrama opterećenja. Na sl. 66b prikazan je jedan od mogućih načina korištenja varijabilne energije hidroelektrana, prikazanih na sl. 66a. Treba naglasiti da je moguć vrlo veliki broj načina korištenja varijabilne energije uz zadovoljenje uvjeta (145) i (146).

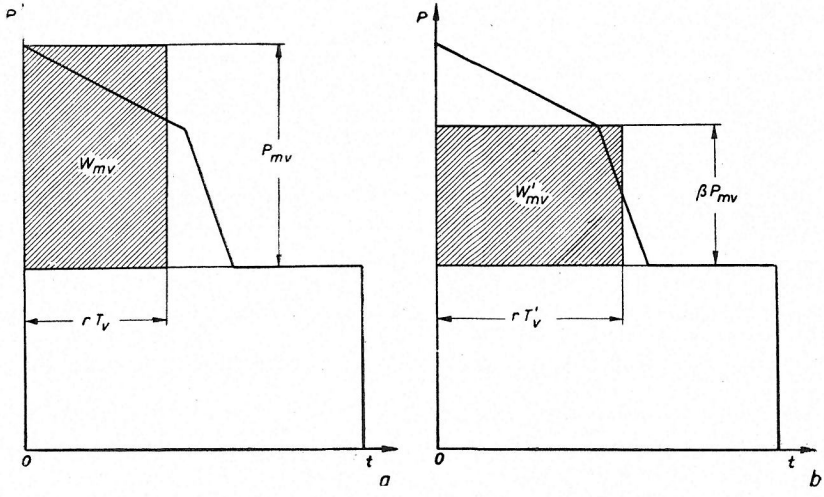


Sl. 67. Primjer mogućnosti zadovoljenja potreba varijabilne energije proizvodnjom dviju hidroelektrana iako je $W_{mv} = W_{hv1} + W_{hv2}$.

Može se, međutim, dogoditi da — i pored toga što su ispunjeni uvjeti (145) i (146) — nije moguće zadovoljiti potrebe varijabilne energije. Takav slučaj je prikazan na sl. 67. Hidroelektrana smještena u donji dio varijabilnog dijela dijagrama ima na raspolaganju toliki dotok, da se mora koristiti prema dijagramu na sl. 19. To se pojavljuje, kad se za određivanje moguće proizvodnje varijabilne energije računa da je vrijeme t_{vh} jednako vremenu trajanja velikih opterećenja t_v, koje je definirano u poglavlju I 1c. Radi toga se i javlja varijabilna energija δW_{hv2} koja se ne može iskoristiti, iako postoji potreba za njom (sl. 67b). Da bi se izbjegli takvi slučajevi treba količinu varijabilne energije hidroelektrana odrediti uz pretpostavku da je $t_{vh} < t_v$, pa je zbog

toga uvedena u poglavlju II 3 posebna oznaka t_{vh} za trajanje razdoblja velikih opterećenja prilikom određivanja moguće proizvodnje varijabilne energije u hidroelektranama. Kad bismo htjeli da iskoristimo svu količinu varijabilne energije, a kad su ispunjene jednadžbe (145) i (146) i kad sve hidroelektrane imaju toliko vode da varijabilnu energiju moraju proizvoditi u vremenu t_{vh} (sl. 19), vrijeme t_{vh} trebalo bi odabrati tako da bude jednako trajanju korištenja T_v varijabilne snage P_{mv}. Trajanje korištenja je definirano osnovicom pravokutnika koji ima visinu P_{mv} i površinu koja odgovara količini varijabilne energije W_{mv} (sl. 68a). Koristeći relaciju (9), veličinu T_v možemo odrediti iz relacije

$$T_v = \frac{\alpha + \beta}{2} t_v \tag{148}$$



Sl. 68. Definicija vremena trajanja T_v (148) i T'_v (150).

Međutim, kad se radi o velikom elektroenergetskom sistemu, možemo računati da se u svim hidroelektranama neće pojaviti takvi dotoci da se sva varijabilna energija mora proizvoditi prema dijagramu na sl. 19, bilo radi različitosti hidroloških karakteristika vodotoka, bilo radi postojanja hidroelektrana sa sezonskim akumulacijama koje će se puniti kad ostale akumulacione hidroelektrane budu morale raditi prema dijagramu na sl. 19. Radi toga neće biti potrebno da bude $t_{vh} = T_v$ (148), već će biti dovoljno da bude zadovoljen uvjet

$$T_v < t_{vh} < t_v \tag{149}$$

Može se, međutim, ocijeniti — uzevši u obzir gornje napomene — da se može s dovoljnom sigurnošću postaviti da t_{vh} treba da bude jednak trajanju korištenja T'_v snage βP_{mv} koje je definirano pravokutnikom na sl. 68 b. Vrijednost T'_v, u slučaju aproksimacije krivulje trajanja trima pravcima, može se odrediti iz relacije

$$t_{vh} = T'_v = \frac{1+\alpha}{2} t_v \tag{150}$$

Jednadžbe (145), (146) i (147) nisu praktički nikada ispunjene, pa je potrebno postići njihovo ispunjenje, bilo stavljanjem u pogon termoelektrana za zadovoljenje potreba u varijabilnom dijelu sa snagom P_{tv} i proizvodnjom W_{tv}, odnosno za zadovoljenje potreba u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja sa snagom P_{tk} i proizvodnjom W_{tk}, bilo prebacivanjem dijela varijabilne energije hidroelektrana ΔW_{hv} u konstantni dio, odnosno prebacivanjem dijela konstantne energije hidroelektrana ΔW_{hk} u varijabilni dio dijagrama opterećenja. Pri tome treba uzeti u obzir i neiskorištene količine varijabilne energije hidroelektrana δW_{hv}, odnosno neiskorištene količine konstantne energije δW_{hk}, ako se one pojavljuju.

Prebacivanje energije iz jednog u drugi dio dijagrama opterećenja povezano je s prebacivanjem snage iz varijabilnog u konstantni dio i obrnuto, pa je potrebno utvrditi kakvi su odnosi — ako takvi odnosi postoje — između prebačene snage i energije.

Za prebacivanje varijabilne energije ΔW_{hv} u konstantni dio potrebno je upotrijebiti varijabilnu snagu koju određujemo iz izraza

$$\Delta P_{hv} = \frac{\Delta W_{hv}}{24\,(r+n)} \tag{151}$$

gdje je u nazivniku broj sati razdoblja (na primjer mjesec) za koji se vrši analiza, jer se prebačena varijabilna energija sada koristi kao konstantna energija koja se proizvodi s konstantnom snagom. Pri tome, nema gubitka energije, jer — prema poglavlju II 3 — ne postoje poteškoće da se mjesto varijabilne energije proizvede konstantna energija. Postoji, dakle, čvrst odnos između prebačene varijabilne energije i prebačene varijabilne snage.

Konstantna energija ΔW_{hk}, prebačena u varijabilni dio dijagrama opterećenja, uvijek je manja od one energije koja se može proizvesti istom snagom ΔP_{hk} u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja, jer se u varijabilnom dijelu ne može kroz cijelo vrijeme koristiti prebačena snaga ΔP_{hk}. Prema tome, postoji relacija

$$\Delta W_{hk} < 24\,(r+n)\,\Delta P_{hk} \tag{152}$$

koja u svakom slučaju mora biti ispunjena. Ako još uzmemo u obzir

da razdoblje velikih opterećenja traje rt_v sati, nejednadžba (152) može se pisati i u obliku

$$\Delta W_{hk} < rt_v \Delta P_{hk} \tag{153}$$

Uzevši u obzir mogućnost korištenja prebačene konstantne energije, te razmatranja za određivanje veličine t_{vh}, može se ustanoviti da količina prebačene konstantne energije treba da zadovoljava uvjet

$$\Delta W_{hk} \leqq rt_{vh} \Delta P_{hk} \tag{154}$$

Što se tiče donje granice za ΔW_{hk}, ona može biti i vrlo malena, ali ipak veća od nule, jer se ne može prebaciti snaga bez proizvodnje energije.

Također je od interesa poznavati neiskorištenu energiju i neiskorištenu snagu. Treba, međutim, naglasiti da ne postoji nikakva veza između neiskorištene varijabilne energije δW_{hv} i neiskorištene varijabilne snage δP_{hv}, pa se događa da se pojavljuje neiskorištena varijabilna snaga, a da ne postoji višak varijabilne energije ($\delta W_{hv} = 0$) i obrnuto: da imamo neiskorištenu varijabilnu energiju, ali da ne postoji neiskorištena varijabilna snaga ($\delta P_{hv} = 0$). S druge strane, ako se pojavi višak konstantne snage hidroelektrana ΔP_{hk} mora postojati i višak konstantne energije koji iznosi

$$\Delta W_{hk} = 24\,(r+n)\,\Delta P_{hk} \tag{155}$$

a koji nastaje radi viška konstantne snage. Ako, međutim, dolazi do prebacivanja konstantne energije u varijabilni dio dijagrama opterećenja, ostat će dio konstantne energije neiskorišten (154). Prema tome, postoji slijedeća veza između neiskorištene konstantne energije i neiskorištene snage

$$\delta W_{hk} \leqq 24\,(r+n)\,\Delta P_{hk} \tag{156}$$

Uzevši u obzir sve gore navedene mogućnosti, možemo postaviti slijedeće četiri jednadžbe koje moraju biti zadovoljene da bi se proizvodnjom i snagom elektrana zadovoljile potrebe

$$W_{mv} = (W_{hv} - \Delta W_{hv} + \Delta W_{hk} - \delta W_{hv}) + W_{tv} \tag{157}$$

$$P_{mv} = (P_{hv} - \Delta P_{hv} + \Delta P_{hk} - \delta P_{hv}) + P_{tv} \tag{158}$$

$$W_{mk} = (W_{hk} - \Delta W_{hk} + \Delta W_{hv} - \delta W_{hk}) + W_{tk} \tag{159}$$

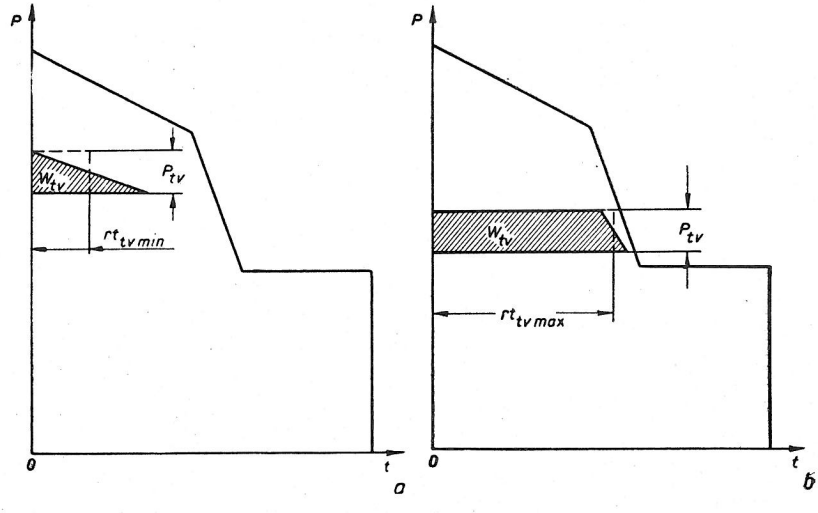
$$P_{mk} = (P_{hk} - \Delta P_{hk} + \Delta P_{hv} - \delta P_{hk}) + P_{tk} \tag{160}$$

Ove jednadžbe prikazuju najopćenitiji slučaj, jer se u praksi ne pojavljuje istodobno potreba prebacivanja i varijabilne i konstantne

energije odnosno potreba istodobnog prebacivanja i varijabilne i konstantne snage, pa se na desnoj strani navedenih jednadžbi pojavljuje bilo drugi bilo treći član, a ne oba istodobno.

U jednadžbama (157) i (159) izrazi u zagradama predstavljaju energiju hidroelektrana, koja se može iskoristiti za pokrivanje varijabilnog, odnosno konstantnog dijela dijagrama opterećenja. Ta iskoristiva energija razlikuje se — u općem slučaju — od moguće proizvodnje hidroelektrana W_{hv} i W_{hk} za količinu energije koja se prebacuje ΔW_{hv} i ΔW_{hk}, te za količinu energije koja ostaje neiskorištena δW_{hv} i δW_{hk}.

Zbroj u zagradi jednadžbe (158) predstavlja varijabilno opterećenje hidroelektrana u času maksimalnog opterećenja sistema. Ta maksimalno korištena snaga hidroelektrana općenito se razlikuje od maksimalne raspoložive snage hidroelektrana za neiskorištenu snagu. S druge strane, izraz u zagradi jednadžbe (160) prikazuje opterećenje hidroelektrana u razdoblju malih opterećenja.



Sl. 69. Definicije vremena trajanja korištenja snage termoelektrana $t_{tv\,min}$ (162) i $t_{tv\,max}$ (163).

Prije nego što prijeđemo na razmatranje pojedinih slučajeva potrebno je da nešto kažemo o potrebnoj snazi i proizvodnji termoelektrana.

U konstantnom dijelu dijagrama, potrebnom snagom termoelektrana određena je njihova proizvodnja izrazom

$$W_{tk} = 24\,(r+n)\,P_{tk} \tag{161}$$

Potreba angažiranja termoelektrana za pokrivanje varijabilnog dijela dijagrama opterećenja može nastati radi pomanjkanja snage

u času maksimalnog opterećenja sistema, radi pomanjkanja energije u tom dijelu dijagrama opterećenja ili, konačno, radi pomanjkanja i energije i snage.

Ako se radi samo o pomanjkanju snage, poželjno je da termoelektrane potrebnom snagom proizvedu što manje energije. Tu obično postoje ograničenja radi toga što je nemoguće, a često puta i nepoželjno, da se termoelektrane izvrgnu brzim promjenama opterećenja, do čega bi došlo kad bi se postavio zahtjev da termoelektrana pokriva najviši ili vrlo visoki dio dijagrama opterećenja. Da bi se to eliminiralo, potrebno je računati da snaga termoelektrana angažirana za pokrivanje manjka varijabilne snage ne bude korištena u radnom danu u kraćem vremenu od nekog minimalnog vremena $t_{tv\min}$, koje treba odrediti na osnovu pogonskih svojstava termoelektrana. Minimalno trajanje korištenja angažirane snage termoelektrana u promatranom razdoblju (na primjer mjesec) iznosi, dakle, $rt_{tv\min}$ (sl. 69a). Prema tome, za slučaj da nedostaje samo snaga u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja, potrebna proizvodnja termoelektrana angažiranih snagom P_{tv} za pokrivanje tog manjka, iznosi

$$W_{tv} = rt_{tv\min} P_{tv} \tag{162}$$

U slučaju pomanjkanja samo energije u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja, korisno je proizvesti tu energiju sa što manjom snagom termoelektrana, što znači da je potrebno ostvariti što veće iskorištenje angažirane snage. Trajanje korištenja angažirane snage $t_{tv\max}$ (sl. 69b) određeno je oblikom krivulje trajanja opterećenja. Istim razmatranjem kao za t_{vh} može se ocijeniti da $t_{tv\max}$ ne treba da bude veće od T'_v (150). Dakle, kad postoji u varijabilnom dijelu samo manjak energije koju treba nadoknaditi proizvodnjom termoelektrana W_{tv}, potrebna snaga termoelektrana za eliminiranje tog manjka iznosi

$$P_{tv} = \frac{W_{tv}}{rt_{tv\max}} \tag{163}$$

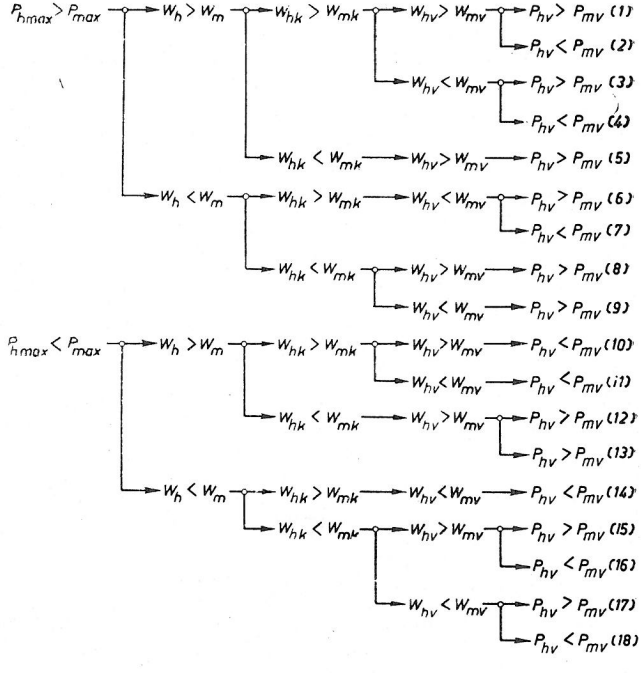
Konačno treba naglasiti, da metoda varijabilne i konstantne energije vrijedi i za bilo kakav oblik krivulje trajanja, uz uvjet da se odredi vrijeme t_{vh}, mjerodavno za podjelu moguće proizvodnje hidroelektrana na varijabilnu i konstantnu energiju.

b) Mogući slučajevi i izrada elektroenergetskih bilanca

Analizirajući moguće slučajeve međusobnih odnosa karakterističnih veličina konzuma (maksimalno opterećenje $P_{\max}$, ukupna potrebna energija W_m, potrebna konstantna energija W_{mk}, potrebna varijabilna energija W_{mv} i potrebna varijabilna snaga P_{mv}) s karakterističnim veličinama hidroelektrana (maksimalna snaga hidroelek-

trana $P_{h\,\max}$, ukupna moguća proizvodnja hidroelektrana W_h, moguća proizvodnja konstantne energije u hidroelektranama W_{hk}, moguća proizvodnja varijabilne energije u hidroelektranama W_{hv} i varijabilna snaga hidroelektrana P_{hv}) dolazimo do zaključka da postoji 18 mogućih slučajeva, koji su navedeni na sl. 70. Treba napomenuti da u tih 18 slučajeva nisu ubrojeni oni slučajevi u kojima se pojavljuju jednakosti između dviju odgovarajućih veličina (na primjer, $P_{h\,\max} = P_{\max}$), jer predstavljaju granične slučajeve onih situacija koje su navedene na sl. 70.

Treba naglasiti da prilikom određivanja kojem slučaju odgovara promatrana situacija u elektroenergetskom sitemu treba za W_{hk} (sl. 70) uzeti onu količinu konstantne energije koja se može predati potro-



Sl. 70. Mogući slučajevi međusobnih odnosa karakterističnih veličina konzuma i karakterističnih mogućnosti proizvodnje hidroelektrana.

šačima, uzevši u obzir da se višak konstantne energije smješta u najniži dio varijabilnog dijela dijagrama opterećenja. Naravno da gornja napomena vrijedi samo za slučajeve kad je $W_{hk} > W_{mk}$. Prilikom numeričke izrade elektroenergetskih bilanci, međutim, treba u račun ući s ukupno mogućom proizvodnjom konstantne energije, jer će račun pokazati što se od toga može iskoristiti.

Promotrimo sada pojedinačno slučajeve navedene na sl. 70.

Prvih pet slučajeva — (1) do (5) — predstavljaju situacije u kojima se mogu zadovoljiti potrebe i bez angažiranja termoelektrana, jer su u svim slučajevima zadovoljene nejednadžbe (143) i (144). Manjak energije i snage u varijabilnom dijelu, odnosno u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja, može se nadoknaditi prebacivanjem energije i snage iz konstantnog, odnosno iz varijabilnog dijela dijagrama opterećenja.

Tab. 12. Elektroenergetska bilanca prema metodi konstantne i varijabilne energije za slučaj 5 (sl. 70).

Slučaj 5

	oznake		Energija GWh	Snaga MW
	za energiju	za snagu		
Ukupno				
hidroelektrane	W_h	P_h	1142,3	2210,0
potrebe	W_m	P_{max}	1100,0	2150,0
razlika	ΔW	ΔP	+ 42,3	+ 60,0
Varijabilni dio				
hidroelektrane	W_{hv}	P_{hv}	405,0	1200,0
potrebe	W_{mv}	P_{mv}	297,0	1050,0
razlika	ΔW_v	ΔP_v	+ 108,0	+ 150,0
iz konstantnog dijela	ΔW_{hk}	ΔP_{hk}	—	—
u konstantni dio	ΔW_{hv}	ΔP_{hv}	— 65,7	— 90,0
termoelektrane	W_{tv}	P_{tv}	—	—
neiskorišteno	δW_{hv}	δP_{hv}	— 42,3	— 60,0
Konstantni dio				
hidroelektrane	W_{hk}	P_{hk}	737,3	1010,0
potrebe	W_{mk}	P_{mk}	803,0	1100,0
razlika	ΔW_k	ΔP_k	— 65,7	— 90,0
iz varijabilnog dijela	ΔW_{hv}	ΔP_{hv}	+ 65,7	+ 90,0
u varijabilni dio	ΔW_{hk}	ΔP_{hk}	—	—
termoelektrane	W_{tk}	P_{tk}	—	—
neiskorišteno	δW_{hk}	δP_{hk}	—	—
ukupno termoelektrane	W_t	P_t	—	—
ukupno neiskorišteno	δW_h	δP_h	42,3	60,0

Tako, na primjer, u slučaju (5) postoji višak i energije i snage u varijabilnom dijelu, pa se taj višak može iskoristiti za pokrivanje manjka u konstantnom dijelu, kako je to prikazano na numeričkom primjeru u tabeli 12 Za pokrivanje manjka u konstantnom dijelu potrebno je — u primjeru u tabeli 12 — 65,7 GWh, koji postoje kao višak u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja. Da bi se prebacila

potrebna količina energije potrebna je snaga od 90,0 MW, koja, također, stoji na raspolaganju kao višak u varijabilnom delu. Potrebna snaga za prebacivanje varijabilne energije određena je prema (151), a uz pretpostavku da je $24\,(r + n) = 730$ sati, jer se radi o mjesečnoj bilanci. Nakon prebacivanja potrebne varijabilne energije i snage u konstantni dio još ostaje višak od 42,3 GWh i 60,0 MW u varijabilnom dijelu, koji su u bilancama označeni s negativnim predznakom, jer se radi o preljevu, odnosno o neiskorištenoj snazi. Na dnu tabele navedeni su podaci o ukupno potrebnoj proizvodnji i snazi termoelektrana (u primjeru u tabeli 12 nisu potrebne termoelektrane!), i o ukupnoj neiskorištenoj energiji i snazi hidroelektrana.

U slučajevima (6) do (9) postoji višak snage hidroelektrana iznad potrebne snage u momentu maksimalnog opterećenja, ali je ipak u svim slučajevima potrebno angažirati termoelektrane, jer postoji manjak energije.

U slučajevima (6) i (7) pojavljuje se višak energije i snage u konstantnom dijelu, pa se dio manjka varijabilne energije može pokriti prebačenom konstantnom energijom, dok se nasuprot tome sav manjak snage u varijabilnom dijelu može nadoknaditi viškom snage iz konstantnog dije'a, jer je ispunjen uvjet $P_{h\,\max} > P_{\max}$. Međutim, i pored prebacivanja konstantne energije u varijabilni dio, preostat će manjak kojega treba pokriti proizvodnjom termoelektrana, ali uz uvjet da se postigne potrebna proizvodnja uz što manju angažiranu snagu. Da bi se postigao gore navedeni cilj, trajanje korištenja snage termoelektrana treba da bude $t_{tv\,\max}$ (163). U tabeli 13 prikazan je numerički primjer za slučaj (7). Prebacivanje konstantne energije hidroelektrana izvršeno je uz pretpostavku da je $a = 0{,}60$, pa je $T'_v = t_{vh} = 0{,}80\ t_v$ (150), a odatle je — uz $t_v = 18$ sati i $r = 25$ dana — $rt_{vh} = 360$ sati/mjesec, da bi se iskoristila što veća količina konstantne energije. Prema izloženom na kraju poglavlja IV 3a istu vrijednost ima i $rt_{tv\,\max}$. U primjeru u tabeli 13 s viškom snage iz konstantnog dijela od 100,0 MW, može se, dakle, u varijabilni dio prebaciti 36,0 GWh, pa ostaje još manjak energije od 56,0 GWh, koji se uz $rt_{tv\,\max} = 360$ sati može eliminirati snagom termoelektrana od 155,6 MW. Preostaje, dakle, neiskorištena konstantna energija od 37,0 GWh i varijabilna snaga od 175,6 MW. Slučaj (6) razlikuje se od slučaja (7), samo u višku varijabilne snage, dok se neiskorištena snaga hidroelektrana još povećava.

U slučajevima (8) i (9) imamo manjak energije i snage u konstantnom dijelu i višak snage u varijabilnom dijelu. U slučaju (8) dio viška snage u varijabilnom dijelu može se djelomično iskoristiti za pokrivanje manjka u konstantnom dijelu, jer postoji višak varijabilne energije. To se u slučaju (9) ne može postići, jer takav višak ne postoji. U tabeli 14 prikazan je primjer za slučaj (8) u kojemu se višak varijabilne energije od 43,0 GWh prebacuje u konstantni dio, snagom od 58,9 MW, koja je određena prema (151). U konstantnom dijelu, međutim, i pored prebacivanja iz varijabilnog dijela ostaje manjak, kojega treba

Tab. 13. *Elektroenergetska bilanca prema metodi konstantne i varijabilne energije za slučaj* 7 *(sl.* 70*).*

Slučaj 7

	oznake		Energija	Snaga
	za energiju	za snagu	GWh	MW
Ukupno				
hidroelektrane	W_k	P_h	1081,0	2170,0
potrebe	W_m	P_{max}	1100,0	2150,0
razlika	ΔW	ΔP	— 19,0	+ 20,0
Varijabilni dio				
hidroelektrane	W_{hv}	P_{hv}	205,0	970,0
potrebe	W_{mv}	P_{mv}	297,0	1050,0
razlika	ΔW_v	ΔP_v	— 92,0	— 80,0
iz konstantnog dijela	ΔW_{hk}	ΔP_{hk}	+ 36,0	+ 100,0
u konstantni dio	ΔW_{hv}	ΔP_{hv}	—	—
termoelektrane	W_{tv}	P_{tv}	+ 56,0	+ 155,6
neiskorišteno	δW_{hv}	δP_{hv}	—	— 175,6
Konstantni dio				
hidroelektrane	W_{hk}	P_{hk}	876,0	1200,0
potrebe	W_{mk}	P_{mk}	803,0	1100,0
razlika	ΔW_k	ΔP_k	+ 73,0	+ 100,0
iz varijabilnog dijela	ΔW_{hv}	ΔP_{hv}	—	—
u varijabilni dio	ΔW_{hk}	ΔP_{hk}	— 36,0	— 100,0
termoelektrane	W_{tk}	P_{tk}	—	—
neiskorišteno	δW_{hk}	δP_{hk}	— 37,0	—
ukupno termoelektrane	W_t	P_t	56,0	155,6
ukupno neiskorišteno	ΔW_h	ΔP_h	37,0	175,6

dopuniti s 30,0 GWh energije iz termoelektrana, što se može ostvariti snagom od 41,1 MW. Ostaje, dakle, neiskorištena snaga hidroelektrana od 81,1 MW, dok se ne pojavljuje neiskorištena energija hidroelektrana. U slučaju (9) treba za pokrivanje i u varijabilnom i u konstantnom dijelu angažirati termoelektrane. U varijabilnom dijelu, međutim, termoelektrane su potrebne samo za pokrivanje manjka energije, jer postoji višak snage, pa potrebnu snagu termoelektrana treba odrediti uz zahtjev što većeg iskorištenja (163). U slučajevima (8) i (9) ukupna potrebna proizvodnja termoelektrana iznosi upravo toliko koliko iznosi ukupni manjak energije ΔW.

U slučajevima (10) do (13) imamo višak energije, ali je potrebna dopuna termoelektranama, jer je maksimalna snaga hidroelektrana manja od maksimalnog opterećenja. U sva četiri navedena slučaja potrebno je angažirati upravo onoliku snagu termoelektrana koliko iznosi ukupni manjak snaga, a angažiranu snagu koristiti s minimalno mogućim korištenjem. U tabeli 15 prikazan je primjer za slučaj (10). Ukupni

Tab. 14. Elektroenergetska bilanca prema metodi konstantne i varijabilne energije za slučaj 8 (sl. 70).

Slučaj 8

	Oznake za energiju	Oznake za snagu	Energija GWh	Snaga MW
Ukupno				
hidroelektrane	W_h	P_h	1070,0	2190,0
potrebe	W_m	P_{max}	1100,0	2150,0
razlika	ΔW	ΔP	— 30,0	+ 40,0
Varijabilni dio				
hidroelektrane	W_{hv}	P_{hv}	340,0	1190,0
potrebe	W_{mv}	P_{mv}	297,0	1050,0
razlika	ΔW_v	ΔP_v	+ 43,0	+ 140,0
iz konstantnog dijela	ΔW_{hk}	ΔP_{hk}	—	—
u konstantni dio	ΔW_{hv}	ΔP_{hv}	— 43,0	— 58,9
termoelektrane	W_{tv}	P_{tv}	—	—
neiskorišteno	δW_{hv}	δP_{hv}	—	— 81,1
Konstantni dio				
hidroelektrane	W_{hk}	P_{hk}	730,0	1000,0
potrebe	W_{mk}	P_{mk}	803,0	1100,0
razlika	ΔW_k	ΔP_k	— 73,0	— 100,0
iz varijabilnog dijela	ΔW_{hv}	ΔP_{hv}	+ 43,0	+ 58,9
u varijabilni dio	ΔW_{hk}	ΔP_{hk}	—	—
termoelektrane	W_{tk}	P_{tk}	+ 30,0	+ 41,1
neiskorišteno	δW_{hk}	δP_{hk}	—	—
ukupno termoelektrane	W_t	P_t	30,0	41,1
ukupno neiskorišteno	δW_h	δP_h	—	81,1

manjak snage iznosi 80,0 MW, pa — uz pretpostavku da je $t_{tv\,min} = 6$ sati odnosno $rt_{tv\,min} = 150$ sati — minimalna proizvodnja termoelektrana iznosi 12,0 GWh (162). Dodavanjem proizvodnje termoelektrana još se više povećava višak energije u varijabilnom dijelu, ali, i pored toga, još uvijek postoji manjak snage od 100,0 MW, koji se može eliminirati prebacivanjem viška snage iz konstantnog dijela. Kolika će se energija prebaciti iz konstantnog dijela sasvim je svejedno, jer je za konačni rezultat svejedno da li će ostati neiskorištena konstantna ili varijabilna energija. Takvu situaciju — s obzirom na količinu prebačene konstantne energije — nemamo u slučaju (11) kada je potrebno prebaciti najveću moguću količinu energije, odnosno onu količinu kojom će se eliminirati manjkovi preostali nakon ostvarenja minimalne proizvodnje termoelektrana. U slučajevima (12) i (13) sav manjak konstantne energije i snage pokriva se prebacivanjem varijabilne energije i snage, bez obzira da li postoji višak ili manjak varijabilne snage,

Tab. 15. *Elektroenergetska bilanca prema metodi konstantne i varijabilne energije za slučaj* 10 *(sl.* 70*).*

Slučaj 10

	oznake		Energija	Snaga
	za energiju	za snagu	*GWh*	*MW*
Ukupno				
hidroelektrane	W_h	P_h	1186,0	2070,0
potrebe	W_m	P_{max}	1100,0	2150,0
razlika	ΔW	ΔP	+ 86,0	— 80,0
Varijabilni dio				
hidroelektrane	W_{hv}	P_{hv}	310,0	870,0
potrebe	W_{mv}	P_{mv}	297,0	1050,0
razlika	ΔW_v	ΔP_v	+ 13,0	—180,0
iz konstantnog dijela	ΔW_{hk}	ΔP_{hk}	+ 23,0	+ 100,0
u konstantni dio	ΔW_{hv}	ΔP_{hv}	—	—
termoelektrane	W_{tv}	P_{tv}	+ 12,0	+ 80,0
neiskorišteno	δW_{hv}	δP_{hv}	— 48,0	—
Konstantni dio				
hidroelektrane	W_{hk}	P_{hk}	876,0	1200,0
potrebe	W_{mk}	P_{mk}	803,0	1100,0
razlika	ΔW_k	ΔP_k	+ 73,0	+ 100,0
iz varijabilnog dijela	ΔW_{hv}	ΔP_{hv}	—	—
u varijabilni dio	ΔW_{hk}	ΔP_{hk}	— 23,0	—100,0
termoelektrane	W_{tk}	P_{tk}	—	—
neiskorišteno	δW_{hk}	δP_{hk}	— 50,0	—
ukupno termoelektrane	W_t	P_t	12,0	80,0
ukupno neiskorišteno	δW_h	δP_h	98,0	—

jer u svakom slučaju najpovoljnije je termoelektrane smjestiti u varijabilni dio, da bi se postigla što manja proizvodnja termoelektrana.

U slučajevima (14) do (18) postoji i manjak snage i manjak energije. U slučaju (14), kad postoji višak konstantne energije, potrebno je dio tog viška prebaciti u varijabilni dio, ali tako da se prebaci cijeli višak snage uz njegovo maksimalno moguće korištenje (rt_{vh} sati). Preostali manjak treba dopuniti potrebnom snagom i potrebnom proizvodnjom iz termoelektrana. Promotrimo sada slučaj (15) kad postoji manjak konstantne energije i snage, a višak varijabilne energije i snage. Potrebno je iskoristiti svu moguću proizvodnju hidroelektrana, a to se može postići prebacivanjem varijabilne energije, za koje je potrebna i varijabilna snaga određena relacijom (151), što je moguće bez daljnjega učiniti kad je

$$\Delta P_v \geqq \frac{\Delta W_v}{24\,(r+n)} \tag{164}$$

U tom slučaju preostali manjak u konstantnom dijelu dopunjuje se termoelektranama, pa imamo slučaj sličan onome u tabeli 14. Međutim, ako nije ispunjena nejednadžba (164), odnosno ako je

$$\Delta P_v < \frac{\Delta W_v}{24\,(r+n)} \tag{165}$$

za prebacivanje viška varijabilne energije ΔW_v potrebna je veća snaga od one koja se pojavljuje kao višak varijabilne snage ΔP_v, pa će — ako se hoće prebaciti sav višak varijabilne energije — biti potrebna dopunska snaga iz termoelektrana, da bi se nadoknadio tako nastali manjak snage. Ta potrebna dopunska snaga termoelektrana iznosit će

$$P_{tv1} = \frac{\Delta W_v}{24\,(r+n)} - \Delta P_v \tag{166}$$

Pomoću te snage mogli bismo prebaciti sav višak varijabilne energije, kad bi bilo moguće upotrijebiti snagu P_{tv1} bez proizvodnje energije. Angažiranjem snage P_{tv1} mora se — prema pretpostavci — proizvesti minimalna količina energije

$$W_{tv1} = P_{tv1}\, rt_{tv\,\min} \tag{167}$$

pa se, radi toga, pojavljuje dodatni višak energije iz hidroelektrana koji je upravo jednak proizvodnji W_{tv1}. Za prebacivanje tog viška potrebno je upotrijebiti daljnju snagu hidroelektrana, koju opet — da bismo eliminirali manjak snage, koji će radi toga nastati — moramo nadoknaditi daljnjom dodatnom snagom iz termoelektrana, koja je jednaka

$$P_{tv2} = \frac{W_{tv1}}{24\,(r+n)} \tag{168}$$

odnosno nakon uvrštavanja vrijednosti iz (167)

$$P_{tv2} = P_{tv1}\,\frac{rt_{tv\min}}{24\,(r+n)} \tag{169}$$

Nova snaga P_{tv2} traži novu proizvodnju u termoelektranama, a ta iznosi

$$W_{tv2} = P_{tv2}\, rt_{tv\,\min} \tag{170}$$

odnosno — uzevši u obzir (169) —

$$W_{tv2} = P_{tv1} \frac{(rt_{tv\,\min})^2}{24\,(r+n)} \tag{171}$$

Nova energija prouzrokovat će i novi višak energije iz hidroelektrana, pa traži novu snagu hidroelektrana za prebacivanje viška, te, konačno, novu snagu termoelektrana za eliminiranje manjka snage. Ta nova snaga termoelektrana iznosi

$$P_{tv3} = \frac{W_{tv2}}{24\,(r+n)} \tag{172}$$

a uzevši u obzir (171) dobivamo

$$P_{tv3} = P_{tv1} \left[\frac{rt_{tv\,\min}}{24\,(r+n)}\right]^2 \tag{173}$$

Slično razmatranje mogli bismo nastaviti. Možemo, međutim, konstatirati da se može postaviti općenito da je

$$P_{tvk} = P_{tv1} \left[\frac{rt_{tv\,\min}}{24\,(r+n)}\right]^{k-1} \tag{174}$$

Ukupna potrebna snaga termoelektrana za prebacivanje viška varijabilne energije iznosi, dakle,

$$P_{tv} = P_{tv1} \sum_{1}^{k} \left[\frac{rt_{tv\,\min}}{24\,(r+n)}\right]^{k-1} \tag{175}$$

pa za $k = \infty$ dobivamo

$$P_{tv} = P_{tv1} \left[1 + \frac{rt_{tv\,\min}}{24\,(r+n) - rt_{tv\,\min}}\right] \tag{176}$$

odnosno, nakon uvrštavanja za P_{tv1} vrijednosti iz (166)

$$P_{tv} = \frac{\Delta W_v - 24(r+n)\Delta P_v}{24(r+n) - rt_{tv\,\min}} \tag{177}$$

Tab. 16. Elektroenergetska bilanca prema metodi konstantne i varijabilne energije za slučaj 15 (sl. 70).

Slučaj 15

	Oznake za energiju	Oznake za snagu	Energija GWh	Snaga MW
Ukupno				
hidroelektrane	W_h	P_h	997,0	1970,0
potrebe	W_m	$P_{\max}$	1100,0	2150,0
razlika	ΔW	ΔP	−103,0	−180,0
Varijabilni dio				
hidroelektrane	W_{hv}	P_{hv}	340,0	1070,0
potrebe	W_{mv}	P_{mv}	297,0	1050,0
razlika	ΔW_v	ΔP_v	+ 43,0	+ 20,0
iz konstantnog dijela	ΔW_{hk}	ΔP_{hk}	—	—
u konstantni dio	ΔW_{hv}	ΔP_{hv}	− 50,3	− 68,9
termoelektrane	W_{tv}	P_{tv}	+ 7,3	+ 48,9
neiskorišteno	δW_{hv}	δP_{hv}	—	—
Konstantni dio				
hidroelektrane	W_{hk}	P_{hk}	657,0	900,0
potrebe	W_{mk}	P_{mk}	803,0	1100,0
razlika	ΔW_k	ΔP_k	−146,0	−200,0
iz varijabilnog dijela	ΔW_{hv}	ΔP_{hv}	+ 50,3	+ 68,9
u varijabilni dio	ΔW_{hk}	ΔP_{hk}	—	—
termoelektrane	W_{tk}	P_{tk}	+ 95,7	+131,1
neiskorišteno	δW_{hk}	δP_{hk}	—	—
ukupno termoelektrane	W_t	P_t	103,0	180,0
ukupno neiskorišteno	δW_h	δP_h	—	—

Ako računamo da je $rt_{tv\,\min} = 150$ sati, a $24(r+n) = 730$ sati, te ako uzmemo u obzir da je ΔW_v u GWh, a ΔP_v u MW dobit ćemo iz (177) $P_{tv} = 1{,}724\,\Delta W_v - 1{,}259\,\Delta P_v$ MW. Prema tome u numeričkom primjeru za slučaj (15), koji je prikazan u tabeli 16 potrebna snaga termoelektrana u varijabilnom dijelu iznosi $P_{tv} = 48{,}9$ MW, dok je potrebna proizvodnja termoelektrana $W_{tv} = rt_{tv\,\min} P_{tv} = 7{,}3$ GWh. U konstantni dio sada se prebacuje sav višak snage i energije, koji je porastao radi angažiranja termoelektrana, pa nema ni neiskorištene varijabilne energije, ni neiskorištene varijabilne snage. Omjer između prebačene varijabilne energije i prebačene varijabilne snage treba da bude tačno $24(r+n)$, pa je to i kontrola ispravnosti računa. Preostali manjak konstantne energije

Tab. 17. Elektroenergetska bilanca prema metodi konstantne i varijabilne energije za slučaj 16 (sl. 70).

Slučaj 16

	Oznake		Energija GWh	Snaga MW
	za energiju	za snagu		
Ukupno				
hidroelektrane	W_h	P_h	997,0	1900,0
potrebe	W_m	P_{max}	1100,0	2150,0
razlika	ΔW	ΔP	—103,0	—250,0
Varijabilni dio				
hidroelektrane	W_{hv}	P_{hv}	340,0	1000,0
potrebe	W_{mv}	P_{mv}	297,0	1050,0
razlika	ΔW_v	ΔP_v	+ 43,0	— 50,0
iz konstantnog dijela	ΔW_{hk}	ΔP_{hk}	—	—
u konstantni dio	ΔW_{hv}	ΔP_{hv}	— 63,6	— 87,1
termoelektrane	W_{tv}	P_{tv}	+ 20,6	+ 137,1
neiskorišteno	δW_{hv}	δP_{hv}	—	—
Konstantni dio				
hidroelektrane	W_{hk}	P_{hk}	657,0	900,0
potrebe	W_{mk}	P_{mk}	803,0	1100,0
razlika	ΔW_k	ΔP_k	—146,0	—200,0
iz varijabilnog dijela	ΔW_{hv}	ΔP_{hv}	+ 63,6	+ 87,1
u varijabilni dio	ΔW_{hk}	ΔP_{hk}	—	—
termoelektrane	W_{tk}	P_{tk}	+ 82,4	+ 112,9
neiskorišteno	δW_{hk}	δP_{hk}	—	—
ukupno termoelektrane	W_t	P_t	103,0	250,0
ukupno neiskorišteno	δW_h	δP_h	—	—

— nakon prebacivanja varijabilne energije — eliminira se daljnjim angažiranjem termoelektrana.

Do slične situacije dolazimo u slučaju (16), jer je i tada — uzevši u obzir predznak pred ΔP_v — ispunjena nejednadžba (164), pa tada jednadžba (166) glasi

$$P_{tv1} = \frac{\Delta W_v}{24\,(r+n)} + \Delta P_v \tag{178}$$

jer je sada ΔP_v negativan. Analognim razmatranjem doći ćemo do istog izraza za P_{tv} (177) kao i u slučaju (15), s razlikom da ispred člana, koji sadrži ΔP_v, promijenimo predznak. Možemo, dakle, zaključiti da (177) vrijedi kako za slučaj (15) tako i za slučaj (16) uz uvjet da se uzme u obzir predznak manjka varijabilne snage. U primjeru za slučaj (16) u tabeli 17, potrebna snaga termoelektrana — uz iste pretpostavke

kao za slučaj (15) — određena je prema izrazu $P_{tv} = 1{,}724\ \Delta W_v + 1{,}259\ \Delta P_v$, ako za ΔW_v i ΔP_v uvrstimo njihove apsolutne vrijednosti.

U slučaju (17) postoji manjak varijabilne energije, pa je potrebno angažirati toliku snagu termoelektrana, uz maksimalno moguće iskorištenje $t_{tv\,\max}$, da se eliminira taj manjak.

U slučaju (18) postoji manjak energije i snage kako u varijabilnom tako i u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja. Tada je dovoljno dopuniti manjkove potrebnom snagom i energijom iz termoelektrana, koje su jednake manjkovima. Takvo pravilo ne vrijedi za slučaj kad je potrebna proizvodnja termoelektrana — uz minimalno iskorištenje $t_{tv\,\min}$ potrebne snage — veća od manjka varijabilne energije ΔW_v, jer će se tada pojaviti neiskorištena varijabilna energija hidroelektrana. Ako je, dakle, ispunjena nejednadžba

$$-\Delta W_v > -rt_{tv\,\min} \Delta P_v \tag{179}$$

(uzevši već u obzir predznake za ΔW_v i ΔP_v) pojavit će se nakon stavljanja u pogon termoelektrana, višak varijabilne energije

$$\Delta W'_v = -\Delta W_v + rt_{tv\,\min} \Delta P_v \tag{180}$$

koji je potrebno prebaciti u konstantni dio. Sada bismo mogli provesti isto razmatranje kao u slučaju (15), i to s $\Delta W'_v$ kao viškom varijabilne energije, i s $\Delta P_v = 0$ kao s razlikom varijabilne snage. Tada ćemo doći do zaključka da je za prebacivanje tog dodatnog viška potrebna dodatna snaga termoelektrana — uzevši u obzir i (180) —

$$P'_{tv} = \frac{-\Delta W_v + rt_{tv\,\min} \Delta P_v}{24\,(r+n) - rt_{tv\,\min}} \tag{181}$$

pa je ukupna potrebna snaga termoelektrana u varijabilnom dijelu, uzevši u obzir i manjak snage ΔP_v, radi čijeg je eliminiranja i došlo do viška $\Delta W'_v$,

$$P_{tv} = \frac{-\Delta W_v + 24\,(r+n)\,\Delta P_v}{24\,(r+n) - rt_{tv\,\min}} \tag{182}$$

Prema tome, (182) nije ništa drugo nego izraz (177) u koji su uvrštene vrijednosti za ΔW_v i ΔP_v s njihovim predznacima. Primjer slučaja

Tab. 18. Elektroenergetska bilanca prema metodi konstantne i varijabilne energije za slučaj 17 (sl. 70).

Slučaj 18

	Oznake za energiju	Oznake za snagu	Energija GWh	Snaga MW
Ukupno				
hidroelektrane	W_h	P_h	949,0	1820,0
potrebe	W_m	P_{max}	1100,0	2150,0
razlika	ΔW	ΔP	—151,0	—330,0
Varijabilni dio				
hidroelektrane	W_{hv}	P_{hv}	292,0	920,0
potrebe	W_{mv}	P_{mv}	297,0	1050,0
razlika	ΔW_v	ΔP_v	— 5,0	—130,0
iz konstantnog dijela	ΔW_{hk}	ΔP_{hk}	—	—
u konstantni dio	ΔW_{hv}	ΔP_{hv}	— 18,3	— 25,1
termoelektrane	W_{tv}	P_{tv}	+ 23,3	+ 155,1
neiskorišteno	δW_{hv}	δP_{hv}	—	—
Konstantni dio				
hidroelektrane	W_{hk}	P_{hk}	657,0	900,0
potrebe	W_{mk}	P_{mk}	803,0	1100,0
razlika	ΔW_k	ΔP_k	—146,0	—200,0
iz varijabilnog dijela	ΔW_{hv}	ΔP_{hv}	+ 18,3	+ 25,1
u varijabilni dio	ΔW_{hk}	ΔP_{hk}	—	—
termoelektrane	W_{tk}	P_{tk}	+ 127,7	+ 174,9
neiskorišteno	δW_{hk}	δP_{hk}	—	—
ukupno termoelektrane	W_t	P_t	151,0	330,0
ukupno neiskorišteno	δW_h	δP_h	—	—

(18), kada je ispunjena nejednadžba (179), prikazan je u tabeli 18. Ako ostajemo pri istim pretpostavkama kao u slučaju (16), potrebna snaga termoelektrana u varijabilnom dijelu određena je sada prema izrazu $P_{tv} = -1{,}724\ \Delta W_v + 1{,}259\ \Delta P_v$ u koji uvrštavamo apsolutne vrijednosti za ΔW_v i ΔP_v.

c) Napomene uz metodu konstantne i varijabilne energije

Metoda varijabilne i konstantne energije daje u nekim slučajevima, u pogledu iskorištenja varijabilne energije i snage hidroelektrana samo približno tačan rezultat, jer je bilo potrebno ocijeniti trajanje razdoblja velikih opterećenja (t_{vh}) mjerodavnog za određivanje količine varijabilne energije iz hidroelektrana. O tome je već bilo govora u poglavlju IV 3a. Takva pogreška nastaje kada hidroelektrane proizvode varijabilnu energiju kroz vrijeme $rT'_v = rt_{vh}$ (sl. 68b), gdje t_{vh} definiramo relacijom (150), a njihova je varijabilna snaga P_{hv} veća

od βP_{mv}. Varijabilnu snagu, koja prelazi snagu βP_{mv}, možemo definirati omjerom

$$a_v = \frac{P_{hv} - \beta P_{mv}}{(1-\beta) P_{mv}} \tag{183}$$

koji će nam poslužiti prilikom određivanja pogreške. Pogreška, kako ćemo kasnije vidjeti, ovisi o minimalnom trajanju korištenja $t_{tv\,\min}$ maksimalne snage termoelektrana, angažiranih u varijabilnom dijelu dijagrama, pa je korisno i to trajanje definirati relativnom veličinom

$$b = \frac{t_{tv\min}}{\alpha\, t_v} \tag{184}$$

Da bismo pokazali radi čega nastaju pogreške promotrimo tri slučaja s različitim veličinama a_v, a uvijek uz pretpostavku da se sva varijabilna snaga hidroelektrana proizvodi uz maksimalno trajanje t_{vh}. To znači da u promatranom momentu sve hidroelektrane koriste vodu prema dijagramu na sl. 19. Takva pretpostavka je najnepovoljnija s obzirom na veličinu pogreške. Osim toga, u sva tri slučaja, koja će se razmatrati, pretpostavljeno je da je $b = 0{,}25$ što znači da je računato s malim minimalnim trajanjem korištenja snage termoelektrana u varijabilnom dijelu, jer $t_{tv\,\min}$, na primjer, za $t_v = 18$ sati i $\alpha = 0{,}6$ iznosi 2,7 sati. Pretpostavka o malom $t_{tv\,\min}$ uzeta je iz razloga — kako će se kasnije vidjeti (sl. 78) — što mali $t_{tv\,\min}$ izaziva veću pogrešku.

Da bi se ilustrirala mogućnost pojave pogreške, promatran je konzum prikazan u tabelama 12 do 18, a razmatrana su tri karakteristična slučaja.

Prvi slučaj (tabela 19 i sl. 71) polazi od pretpostavke da je $a_v = 0{,}2$, dakle, da je varijabilna snaga hidroelektrana — uzevši u obzir relaciju (183) — $P_{hv} = \beta P_{mv} + a_v (1 - \beta) P_{mv}$. Moguća proizvodnja varijabilne energije u hidroelektranama (sl. 71a) iznosi $rt_{vh} P_{hv} = \frac{1}{2} (1 + \alpha) rt_v P_{hv}$ (150). Pretpostavljeno je, dalje, da je $W_{hk} < W_{mk}$. Uz navedene pretpostavke, a uz korištenje principa izloženih u prethodnom odjeljku IV 3b, dolazimo do bilance prikazane u tabeli 19, koja pokazuje da je potrebe varijabilne energije moguće zadovoljiti proizvodnjom W_{tv} i snagom P_{tv} termoelektrana, koje su jednake manjku varijabilne energije ΔW_v i snage ΔP_v. Detaljnija analiza, međutim, pokazuje (sl. 71b) da takav zaključak nije ispravan, jer se dio energije hidroelektrana $\delta W'_{hv}$ — uz angažiranu snagu termoelektrana P_{tv}, određenu u tabeli 19 — ne može iskoristiti i jer se, analogno tome, dio potreba $\Delta W'_v = \delta W'_{hv}$ — uz proizvodnju

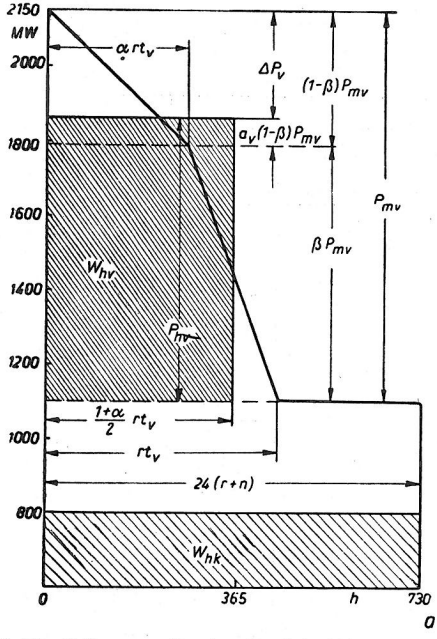
Tab. 19. Elektroenergetska bilanca prema metodi konstantne i varijabilne energije za slučaj, kad je $a_v = 0{,}2$ (183).

	Oznake		Energija GWh	Snaga MW
	za energiju	za snagu		
Ukupno				
hidroelektrane	W_h	P_h	858,3	1562,0
potrebe	W_m	P_{max}	1100,0	2150,0
razlika	ΔW	ΔP	—241,7	—588,0
Varijabilni dio				
hidroelektrane	W_{hv}	P_{hv}	274,3	762,0
potrebe	W_{mv}	P_{mv}	297,0	1050,0
razlika	ΔW_v	ΔP_v	— 22,7	—288,0
iz konstantnog dijela	ΔW_{hk}	ΔP_{hk}	—	—
u konstantni dio	ΔW_{hv}	ΔP_{hv}	—	—
termoelektrane	W_{tv}	P_{tv}	+ 22,7	+288,0
neiskorišteno	δW_{hv}	δP_{hv}	—	—
Konstantni dio				
hidroelektrane	W_{hk}	P_{hk}	584,0	800,0
potrebe	W_{mk}	P_{mk}	803,0	1100,0
razlika	ΔW_k	ΔP_k	—219,0	—300,0
iz varijabilnog dijela	ΔW_{hv}	ΔP_{hv}	—	—
u varijabilni dio	ΔW_{hk}	ΔP_{hk}	—	—
termoelektrane	W_{tk}	P_{tk}	+219,0	+300,0
neiskorišteno	δW_{hk}	δP_{hk}	—	—
ukupno termoelektrane	W_t	P_t	241,7	588,0
ukupno neiskorišteno	δW_h	δP_h	—	—

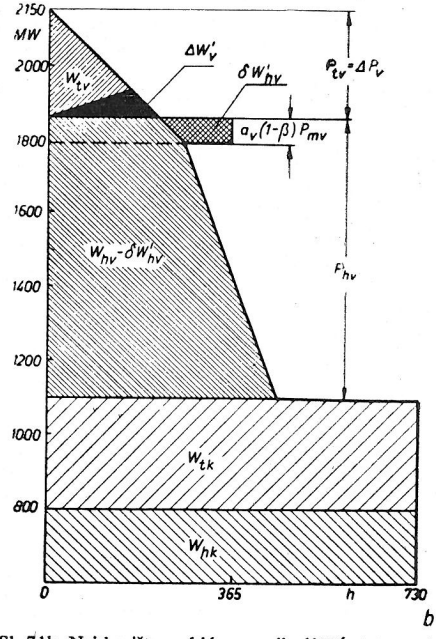
termoelektrana određenu u tabeli 19 — ne može pokriti. Dio energije $\delta W'_{hv}$ ne može se koristiti, jer se snagom $a_v (1 - \beta) P_{mv}$ u tom dijelu dijagrama ne može plasirati sva energija koja se može proizvesti tom snagom. Prema tome bi izgledalo da rezultat dobiven u tabeli 19 daje pogrešnu sliku u pogledu ukupne potrebne proizvodnje $W_{tv} + W_{tk}$ i ukupne potrebne snage $P_{tv} + P_{tk}$ termoelektrana. Međutim, takav je zaključak neispravan. Ako, naime, povećamo angažiranu snagu termoelektrana za pokrivanje varijabilnog opterećenja za ΔP_{tv} ostat će na raspolaganju snaga hidroelektrana $\Delta P'_{hv} = \Delta P_{tv}$ pomoću koje će biti moguće prebaciti dio varijabilne energije u konstantni dio, pa na taj način iskoristiti varijabilnu energiju, koja se, prema sl. 71 b ne može iskoristiti. Ako sada odredimo snagu ΔP_{tv} tako da bude

$$\Delta P_{tv}\, 24\,(r + n) = \Delta P_{tv}\, r t_t + \delta W'_{hv} \tag{185}$$

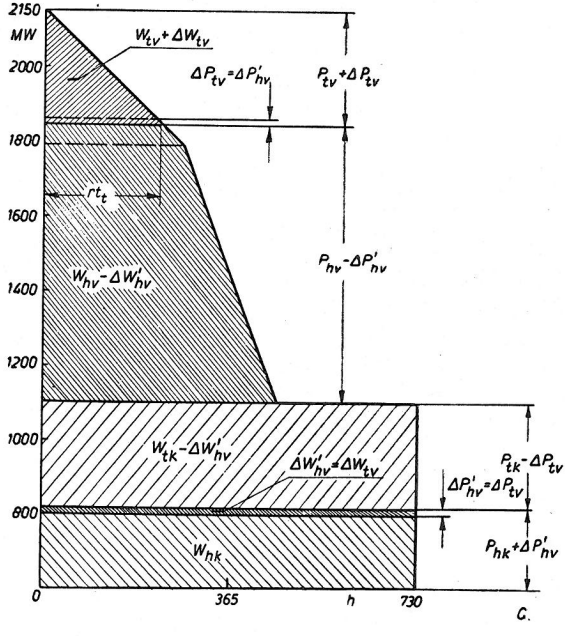
dakle, da varijabilna energija hidroelektrana, koja se sada može prebaciti



Sl. 71a. Prikaz mogućnosti proizvodnje hidroelektrana za slučaj prikazan u tab. 19.

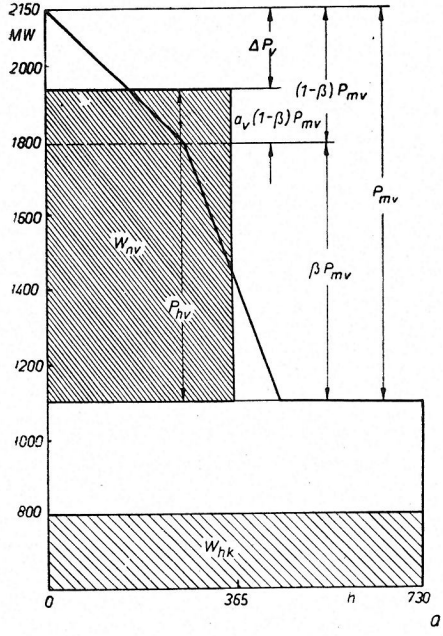


Sl. 71b. Neiskorištena hidroenergija ($\delta W'_{hv}$) i nepokrivene potrebe ($\Delta W'_v$) prema rezultatima bilance u tab. 19.

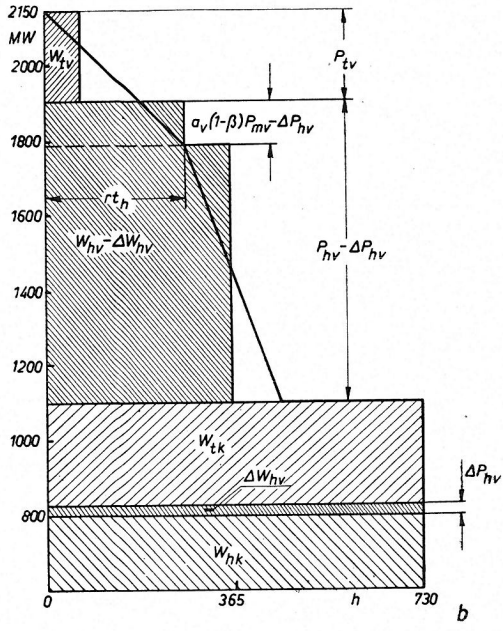


Sl. 71c. Korigirana varijabilna i konstantna snaga hidroelektrana i termoelektrana, kojom se omogućuje zadovoljenje potreba za slučaj prikazan u tab. 19.

u konstantni dio — lijeva strana jednadžbe (185), jer je $\Delta P'_{hv} = \Delta P_{tv}$ — bude jednaka zbroju energije hidroelektrana, koja se zamijenjuje povećanom proizvodnjom termoelektrana, i neiskorištene energije hidroelektrana $\delta W'_{hv}$. Energija hidroelektrana, koja se zamijenjuje povećanom proizvodnjom termoelektrana, određena je produktom povećane snage ΔP_{tv} i trajanja korištenja rt_t te snage (sl. 71 c). Povećanjem snage za ΔP_{tv} dobivamo raspored proizvodnje prikazan na sl. 71c, pa povećanje angažirane snage i potrebne proizvodnje termo-



Sl. 72a. Prikaz mogućnosti proizvodnje hidroelektrana za slučaj prikazan u tab. 20.



Sl. 72b. Mogućnosti proizvodnje hidroelektrana nakon prebacivanja dijela varijabilne energije hidroelektrana u konstantni dio dijagrama opterećenja prema tab. 20

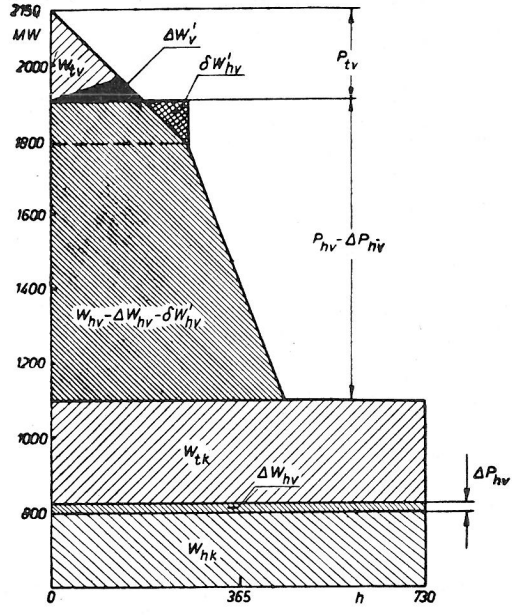
elektrana u varijabilnom dijelu dovodi do isto tolikog smanjenja angažirane snage i potrebne proizvodnje termoelektrana u konstantnom dijelu. Vrijede, naime, relacije

$$\Delta P_{tv} = \Delta P'_{hv} = \frac{\delta W'_{hv}}{24\,(r+n) - rt_t} \tag{186}$$

i

$$\Delta W_{tv} = \Delta W'_{hv} = \Delta P_{tv}\, rt_t + \Delta W'_v = \Delta P'_{hv}\, rt_t + \delta W'_{hv} \tag{186 a}$$

jer je $\Delta W'_v = \delta W'_{hv}$. Prema tome, nakon provedene ispravke, ukupna proizvodnja i ukupna potrebna snaga termoelektrana nisu se promijenile, ali se promijenila podjela potrebne energije i snage između varijabilnog i konstantnog dijela dijagrama opterećenja. Potrebna snaga termoelektrana u varijabilnom dijelu, određena prema tabeli 19 manja



Sl. 72c. Neiskorištena hidroenergija ($\delta W'_{hv}$) i nepokrivene potrebe ($\Delta W'_v$) prema rezultatima bilance u tab. 20.

je od stvarno potrebne snage za ΔP_{tv}, pa pogreška prema ukupno potrebnoj varijabilnoj snazi iznosi

$$\Delta p_{tv} = \frac{\Delta P_{tv}}{P_{mv}} 100\% \tag{187}$$

Na sličan način mogli bismo odrediti i pogrešku za potrebnu energiju iz termoelektrana.

U prikazanom prvom slučaju, potrebna proizvodnja termoelektrana W_{tv} u tabeli 19 jednaka je manjku varijabilne energije ΔW_v jer nije ispunjena nejednadžba (179). S povećanjem snage P_{hv} uz istu pretpostavku njenog korištenja, dakle s povećanjem a_v, doći ćemo do

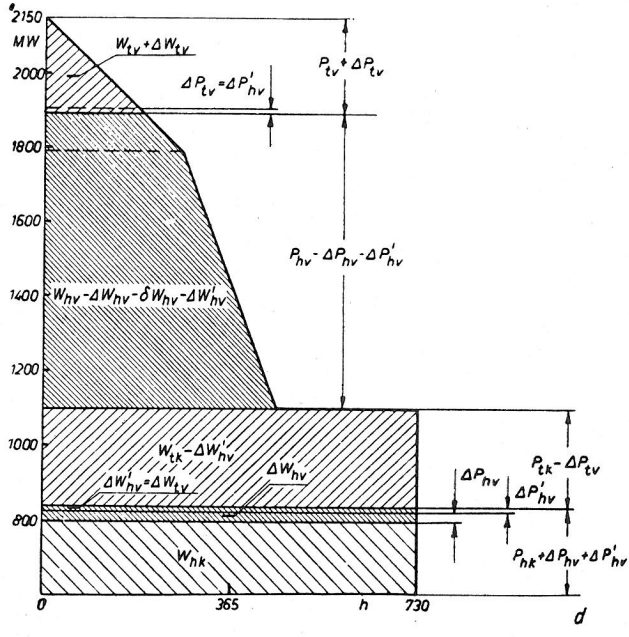
slučaja kad je ispunjena nejednadžba (179) i kad se potrebna snaga iz termoelektrana određuje prema (182), odnosno prema (177). Takav slučaj imamo za $a_v = 0{,}4$ (tabela 20 i sl. 72). Sada je P_{tv} veći od ΔP_v, pa je moguće dio snage ΔP_{hv} i dio energije ΔW_{hv} iz varijabilnog prebaciti u konstantni dio. Radi toga ostaje i manja snaga hidroelektrana $a_v (1 - \beta) P_{mv} - \Delta P_{hv}$ s manjim trajanjem korištenja rt_h na sl. 72 b. Uzevši u obzir mogućnost prilagođavanja dijagramu opterećenja (sl. 72 c), konstatirat ćemo — kao i u prvom slučaju (sl. 71) — da i sada

Tab. 20. Elektroenergetska bilanca prema metodi konstantne i varijabilne energije za slučaj, kad je $a_v = 0{,}4$ (183).

	oznake		Energija GWh	Snage MW
	za energiju	za snagu		
Ukupno				
hidroelektrane	W_h	P_h	884,2	1634,0
potrebe	W_m	P_{max}	1100,0	2150,0
razlika	ΔW	ΔP	—215,8	—516,0
Varijabilni dio				
hidroelektrane	W_{hv}	P_{hv}	300,2	834,0
potrebe	W_{mv}	P_{mv}	297,0	1050,0
razlika	ΔW_v	ΔP_v	+ 3,2	—216,0
iz konstantnog dijela	ΔW_{hk}	ΔP_{hk}	—	—
u konstantni dio	ΔW_{hv}	ΔP_{hv}	— 19,6	— 26,8
termoelektrane	W_{tv}	P_{tv}	+ 16,4	+ 242,8
neiskorišteno	δW_{hv}	δP_{hv}	—	—
Konstantni dio				
hidroelektrane	W_{hk}	P_{hk}	584,0	800,0
potrebe	W_{mk}	P_{mk}	803,0	1100,0
razlika	ΔW_k	ΔP_k	—219,0	—300,0
iz varijabilnog dijela	ΔW_{hv}	ΔP_{hv}	+ 19,6	+ 26,8
u varijabilni dio	ΔW_{hk}	ΔP_{hk}	—	—
termoelektrane	W_{tk}	P_{tk}	+ 199,4	+ 273,2
neiskorišteno	δW_{hk}	δP_{hk}	—	—
ukupno termoelektrane	W_t	P_t	215,8	516,0
ukupno neiskorišteno	δW_h	δP_h	—	—

preostaje dio varijabilne energije hidroelektrana koji se ne može iskoristiti $\delta W'_{hv}$ i dio potreba $\Delta W'_v$ koji se ne može pokriti, iako — prema tabeli 20 — ne postoje ni viškovi hidroenergije ni nemogućnost zadovoljenja konzuma. Na isti način (sl. 72 d) kao u prvom slučaju može se, međutim, pokazati da postoji samo pogreška u raspodjeli potrebne snage termoelektrana na varijabilni i konstantni dio. Za ovaj slučaj vrijede sve formule izvedene za prilike prikazane na sl. 71.

Daljnjim povećanjem snage P_{hv}, odnosno povećanjem a_v, smanjivat će se vrijeme trajanja korištenja rt_h, što će smanjivati i $\delta W'_{hv}$, pa će to konačno dovesti do mogućnosti korištenja varijabilne energije i bez dodatnog povećanja snage termoelektrana, dakle i sa $\Delta P_{tv} = 0$. Takav slučaj, za $a_v = 0{,}8$, prikazan je u tabeli 21 i sl. 73. Sada imamo, dakle, potpuni sklad između tabele 21 i mogućnosti ostvarenja.

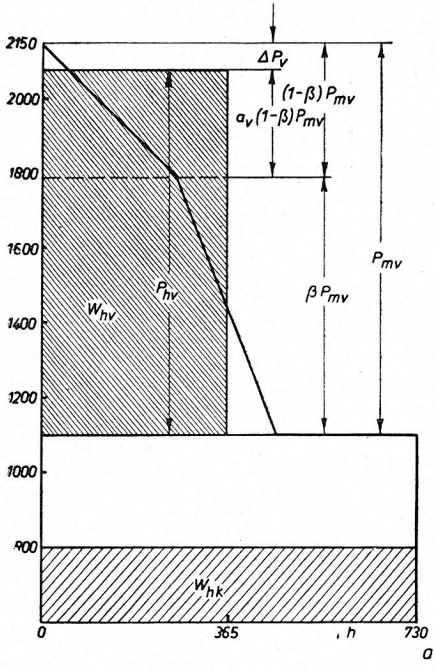


Sl. 72d. Korigirana varijabilna i konstantna snaga hidroelektrana i termoelektrana, kojom se omogućuje zadovoljenje potreba za slučaj prikazan u tab. 20.

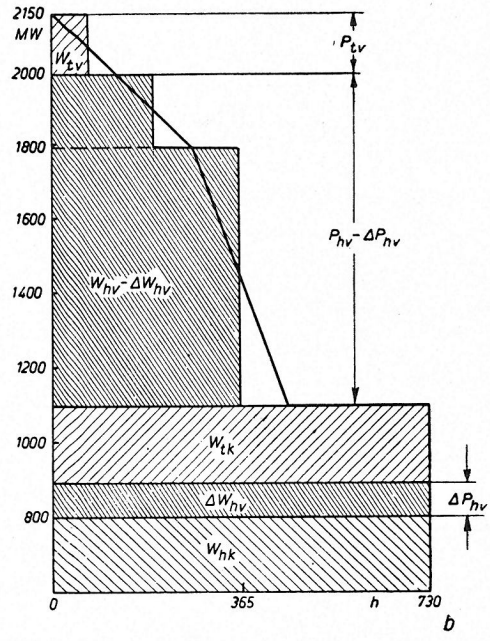
Da bi se pokazala greška u raspodjeli ukupne potrebne snage termoelektrana na varijabilnu i konstantnu snagu, određena je ta pogreška Δp_{tv} (187) u % od varijabilne snage P_{mv}. Na sl. 74 ona je prikazana kao funkcija od a_v (183) za $\alpha + \beta = 1{,}25$ i $\alpha = 0{,}60$ za različite veličine b (184). Krivulja $\Delta p'_{tv}$ prikazuje pogrešku kad se radi o slučaju prikazanom na sl. 71, odnosno kad nije ispunjena nejednadžba (179), dok krivulja $\Delta p''_{tv}$ prikazuje pogrešku za slučaj na sl. 72, odnosno kad je ispunjena nejednadžba (179). Sjecište tih krivulja daje vrijednost a_{vo} za koju se postiže jednakost lijeve i desne strane nejednadžbe (179). Za određivanje pogreške mjerodavni su, dakle, dijelovi krivulja, koji su na sl. 74 prikazani punom linijom. Krivulja $\Delta p'_{tv}$ ne ovisi o veličini b, dok na krivulje $\Delta p''_{tv}$ ima ta veličina znatan utjecaj. Što je manji b pogreška je veća, dok za $b = 0{,}50$ nema pogreške

između bilanca provedenih metodom varijabilne i konstantne energije od onih koje bi se provele detaljnijom analizom. Na sl. 75 prikazane su pogreške za $b = 0{,}25$, ali za različite $\alpha + \beta$ i različite α. Pokazuje se da, uz isti α, veća greška nastaje što je $\alpha + \beta$ manji.

Treba naglasiti da je veličina grešaka, koje su prikazane na sl. 74 i 75, dobivena uz pretpostavku da sve hidroelektrane rade prema

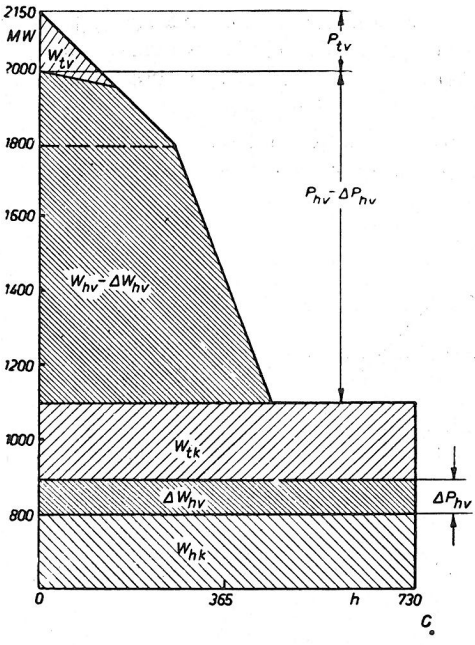


Sl. 73 a. Prikaz mogućnosti proizvodnje hidroelektrana za slučaj prikazan u tabeli 21.

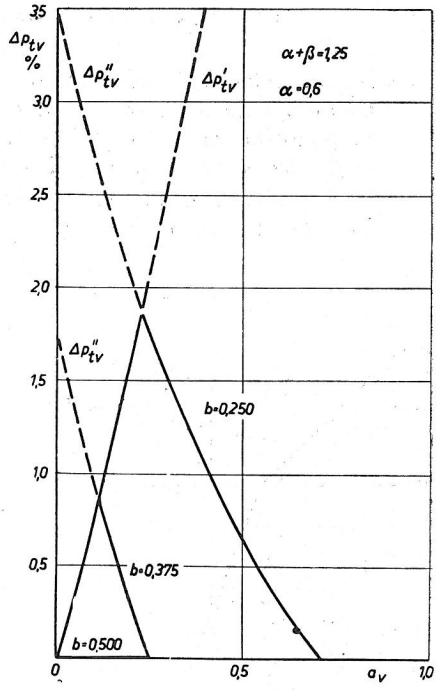


Sl. 73 b. Mogućnosti proizvodnje hidroelektrana nakon prebacivanja dijela varijabilne energije hidroelektrana u konstantn. dio dijagrama opterećenja prema tab. 21.

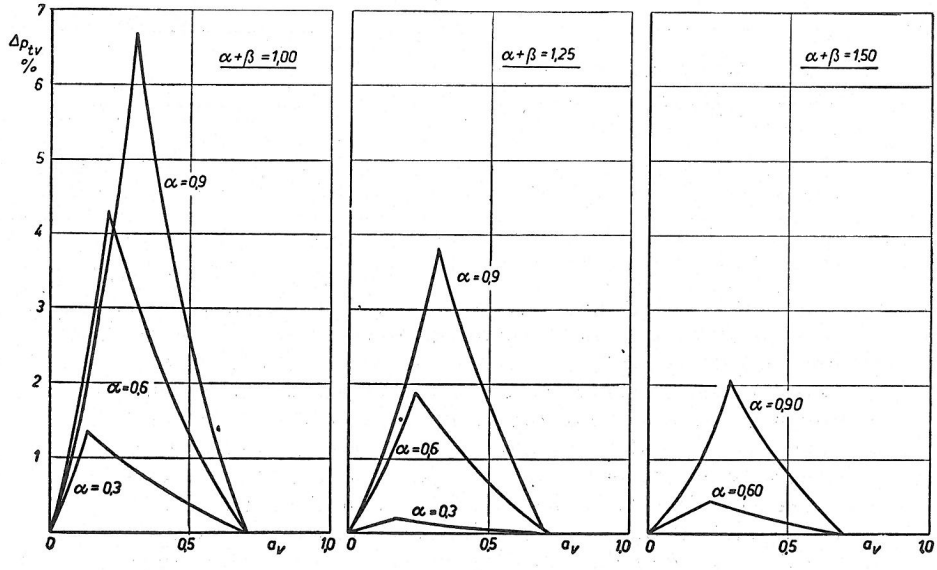
dijagramu na sl. 19. Pogreška bi bila manja ili bi potpuno nestala ako bismo računali da i manji dio hidroelektrana može raditi prema dijagramima na sl. 18 ili 22, što će se najčešće i događati. Prema tome, ta greška podjele potrebne snage termoelektrana na varijabilnu i konstantnu nije takva da bi tražila detaljniju analizu od one predviđene u predloženoj metodi konstantne i varijabilne energije. Osim toga treba napomenuti da prikazane pogreške nastaju kad uz pretpostavke prikazane na sl. 71 i 72 postoji i manjak konstantne energije ($W_{hk} < W_{mk}$), jer je tada interesantno koristiti svu varijabilnu energiju, dok je u slučaju $W_{hk} > W_{mk}$ svejedno da li se varijabilna ili konstantna energija iskorišćuje ili ne.



Sl. 73c. Prikaz proizvodnje hidroelektrana prilagođene potrebama bez korektura u odnosu na bilancu u tab. 21.



Sl. 74. Pogreška Δp_{tv} (187) u raspodjeli potrebne snage termoelektrana za pokrivanje varijabilnog i konstantnog dijela dijagrama opterećenja za različite vrijednosti b (184).



Sl. 75. Pogreška Δp_{tv} (187) u raspodjeli potrebne snage termoelektrana za pokrivanje varijabilnog i konstantnog dijela dijagrama opterećenja za $b = 0,50$ (184), a za različite vrijednosti $\alpha + \beta$ (9).

Tab. 21. Elektroenergetska bilanca prema metodi konstantne i varijabilne energije za slučaj, kad je $a_v = 0{,}8$ *(183).*

	oznake		Energija GWh	Snage WM
	za energiju	za snagu		
Ukupno				
hidroelektrane	W_h	Ph	936,1	1778,0
potrebe	W_m	$P_{\max}$	1100,0	2150,0
razlika	ΔW	ΔP	—163,9	—372,0
Varijabilni dio				
hidroelektrane	W_{hv}	P_{hv}	352,1	978,0
potrebe	W_{mv}	P_{mv}	297,0	1050,0
razlika	ΔW_v	ΔP_v	+ 55,1	— 72,0
iz konstantnog dijela	ΔW_{hk}	ΔP_{hk}	—	—
u konstantni dio	ΔW_{hv}	ΔP_{hv}	— 66,1	— 90,6
termoelektrane	W_{tv}	P_{tv}	+ 11,0	+ 162,6
neiskorišteno	δW_{hv}	δP_{hv}	—	—
Konstantni dio				
hidroelektrane	W_{hk}	P_{hk}	584,0	800,0
potrebe	W_{mk}	P_{mk}	803,0	1100,0
razlika	ΔW_k	ΔP_k	—219,0	—300,0
iz varijabilnog dijela	ΔW_{hv}	ΔP_{hv}	+ 66,1	+ 90,6
u varijabilni dio	ΔW_{hk}	ΔP_{hk}	—	—
termoelektrane	W_{tk}	P_{tk}	+ 152,9	+ 209,4
neiskorišteno	δW_{hk}	δP_{hh}	—	—
ukupno termoelektrane	W_t	P_t	163,9	372,0
ukupno neiskorišteno	δW_h	δP_h	—	—

Druga se pogreška pojavljuje radi unaprijed određene veličine $t_{tv\max}$ (163). Da bi se, naime, mogla odrediti potrebna snaga termoelektrana za pokrivanje potreba u varijabilnom dijelu dijagrama, bilo je potrebno unaprijed ocijeniti veličinu $t_{tv\max}$. Upotreba te veličine dolazi u obzir u slučaju kad je

$$(W_{mv} - W_{hv}) > rt_{tv\max}(P_{mv} - P_{hv}) \tag{188}$$

odnosno kad se snagom $P_{tv} = P_{mv} - P_{hv}$ uz iskorištenje od $rt_{tv\max}$ ne može pokriti manjak energije $W_{mv} - W_{hv}$, pa se tada potrebna snaga iz termoelektrana određuje iz relacije

$$P_{tv} = \frac{W_{mv} - W_{hv}}{rt_{tv\max}} \tag{189}$$

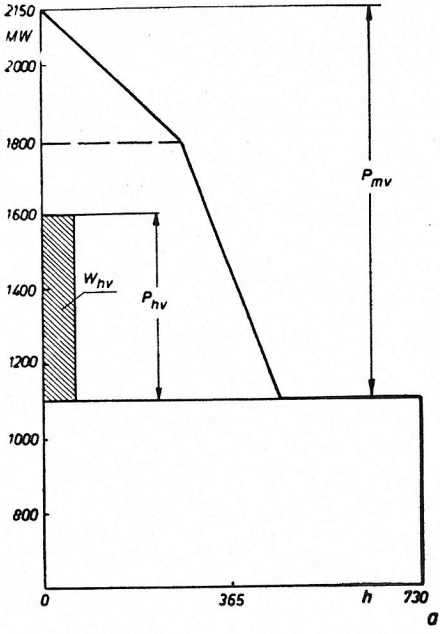
Tab. 22. Energetska bilanca prema metodi konstantne i varijabilne energije za slučaj kad je moguća proizvodnja varijabilne energije vrlo malena, a potrebna snaga termoelektrana određuje se prema (163) ili (189).

	oznake		Energija GWh	Snaga MW
	za energiju	za snagu		
Ukupno				
hidroelektrane	W_h	P_h	30,0	500,0
potrebe	W_m	P_{max}	1100,0	2150,0
razlika	ΔW	ΔP	—1070,0	—1650,0
Varijabilni deo				
hidroelektrane	W_{hv}	P_{hv}	30,0	500,0
potrebe	W_{mv}	P_{mv}	297,0	1050,0
razlika	ΔW_v	ΔP_v	— 267,0	— 550,0
iz konstantnog dijela	ΔW_{hk}	ΔP_{hk}	—	—
u konstantni dio	ΔW_{hv}	ΔP_{hv}	—	—
termoelektrane	W_{tv}	P_{tv}	+ 267,0	+ 741,7
neiskorišteno	δW_{hv}	δP_{hv}	—	— 191,7
Konstantni dio				
hidroelektrane	W_{hk}	P_{hk}	—	—
potrebe	W_{mk}	P_{mk}	803,0	1100,0
razlika	ΔW_k	ΔP_k	— 803,0	—1100,0
iz varijabilnog dijela	ΔW_{kv}	ΔP_{hv}	—	—
u varijabilni dio	ΔW_{hk}	ΔP_{hk}	—	—
termoelektrane	W_{tk}	P_{tk}	+ 803,0	+ 1100,0
neiskorišteno	δW_{hk}	δP_{hk}	—	—
ukupno termoelektrane	W_t	P_t	1070,0	1841,7
ukupno neiskorišteno	δW_h	δP_h	—	191,7

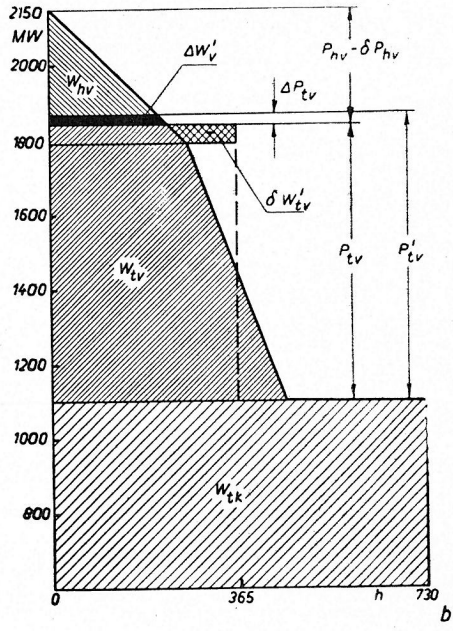
Primjer za takav slučaj prikazan je u tabeli 22 i na sl. 76. Pokazuje se, međutim, da je snaga P_{tv} određena u tabeli 22 premalena za zadovoljenje potrebe, jer se snagom P_{tv} ne može proizvesti — uz zadani dijagram opterećenja — količina energije W_{tv}, koja je potrebna za zadovoljenje konzuma. Taj manjak energije $\Delta W_v'$ (sl. 76 b) koji će stvarno postojati, ali kojeg ne pokazuje bilanca u tabeli 22, mogao bi se nadoknaditi povećanjem snage termoelektrana za ΔP_{tv}, pa ta veličina predstavlja pogrešku. Ako postavimo da je pogreška razlika između snage P_{tv}, koja se dobiva prema tabeli 22, i snage P'_{tv}, koja bi stvarno bila potrebna za zadovoljenje potreba, relativnu pogrešku možemo definirati relacijom

$$\Delta p_{tv} = \frac{P_{tv} - P'_{tv}}{P_{mv}} 100\% \qquad (190)$$

Dakle, za slučaj na sl. 76, pogreška će biti negativna.



Sl. 76a. Prikaz mogućnosti proizvodnje hidroelektrana za slučaj prikazan u tab. 22.



Sl. 76b. Neiskorištena termoenergija (δW_{tv}), manjak snage termoelektrana (ΔP_{tv}) i nepokrivene potrebe ($\Delta W'_v$) prema rezultatima bilance u tab. 22.

Promotrimo sada slučaj prikazan u tabeli 23 i sl. 77 kad imamo više varijabilne energije i kad je, također, zadovoljena nejednadžba (188). Sada se, međutim, pokazuje (sl. 77 b) da je snaga P_{tv} određena prema tabeli 23 nešto veća nego što je neophodno za zadovoljenje potreba. U tom je slučaju, dakle, relativna pogreška — definirana relacijom (190) — pozitivna.

U oba slučaja, uspoređujući rezultate dobivene prema metodi konstantne i varijabilne energije sa stvarnim potrebama, imamo pogrešku u određivanju potrebne snage iz termoelektrana, dok je nasuprot, tome tačno određena potrebna proizvodnja termoelektrana. Za male količine varijabilne energije iz hidroelektrana ta pogreška je negativna dok je za veće količine varijabilne energije ta pogreška pozitivna. Da bi se dobio uvid u veličinu pogreške, prikazana je na sl. 78 ovisnost pogreške o omjeru između raspoložive varijabilne energije hidroelektrana W_{hv} i potrebne varijabilne energije W_{mv}. Taj omjer označen je s h_v. Nema pogreške kad je varijabilna energija hidroelektrana jednaka ukupnoj potrebi varijabilne energije i kad je raspoloživa varijabilna energija upravo dovoljna da pokrije gornji uži dio dijagrama opte-

Tab. 23. Elektroenergetska bilanca prema metodi konstantne i varijabilne energije za slučaj kad je moguća proizvodnja varijabilne energije veća nego u tab. 22, a potrebna snaga termoelektrana određuje se prema (163) ili (189).

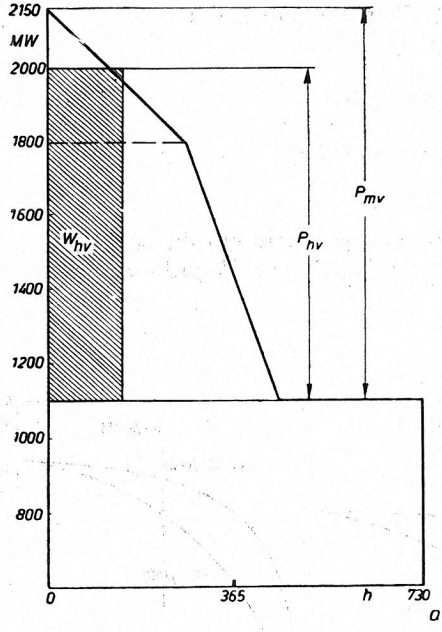
	oznake		Energija GWh	Snage MW
	za energiju	za snagu		
Ukupno				
hidroelektrane	W_h	P_h	128,0	890,0
potrebe	W_m	P_{max}	1100,0	2150,0
razlika	ΔW	ΔP	—972,0	—1260,0
Varijabilni dio				
hidroelektrane	W_{hv}	P_{hv}	128,0	890,0
portebe	W_{mv}	P_{mv}	297,0	1050,0
razlika	ΔW_v	ΔP_v	—169,0	— 160,0
iz konstantnog dijela	ΔW_{hk}	ΔP_{hk}	—	—
u konstantni dio	ΔW_{hv}	ΔP_{hv}	—	—
termoelektrane	W_{tv}	P_{tv}	+ 169,0	+ 469,4
neiskorišteno	δW_{hv}	δP_{hv}	—	— 309,4
Konstantni dio				
hidroelektrane	W_{hk}	P_{hk}	—	—
potrebe	W_{mk}	P_{mk}	803,0	1100,0
razlika	ΔW_k	ΔP_k	—803,0	—1100,0
iz varijabilnog dijela	ΔW_{hv}	ΔP_{hv}	—	—
u varijabilni dio	ΔW_{hk}	ΔP_{hk}	—	—
termoelektrane	W_{tk}	P_{tk}	+ 803,0	+ 1100,0
neiskorišteno	δW_{hk}	δP_{hk}	—	—
ukupno termoelektrane	W_t	P_t	972,0	1569,4
ukupno neiskorišteno	δW_h	δP_h	—	309,4

rećenja. Velika negativna pogreška pojavljuje se za male vrijednosti β i ona je to veća što je manji zbroj $\alpha + \beta$, dok se najveće pozitivne pogreške javljaju kad je α maleno.

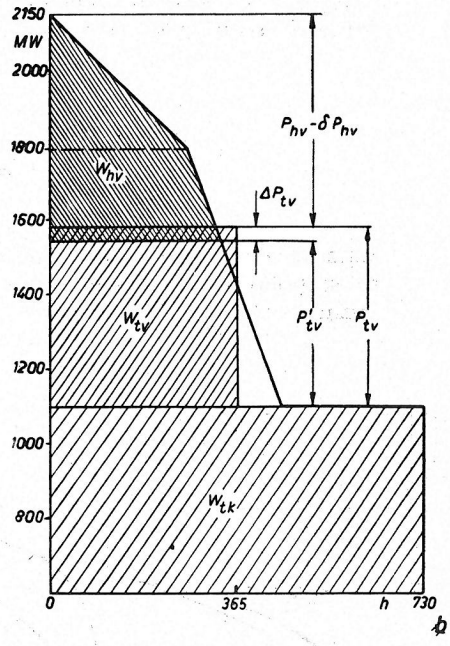
Međutim, ako bismo se ograničili samo na promatranje sl. 78, ne uzevši u obzir da se te pogreške javljaju samo onda kad je ispunjena nejednadžba (188), mogli bismo dobiti krivu sliku o stvarnoj pojavi pogrešaka. Da bi se dobila slika o slučajevima kad vrijedi nejednadžba (188), navest ćemo — kao karakteristiku mogućnosti hidroelektrana u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja — veličinu T_{vh}, koja je određena relacijom

$$rT_{hv} = \frac{W_{hv}}{P_{hv}} \tag{191}$$

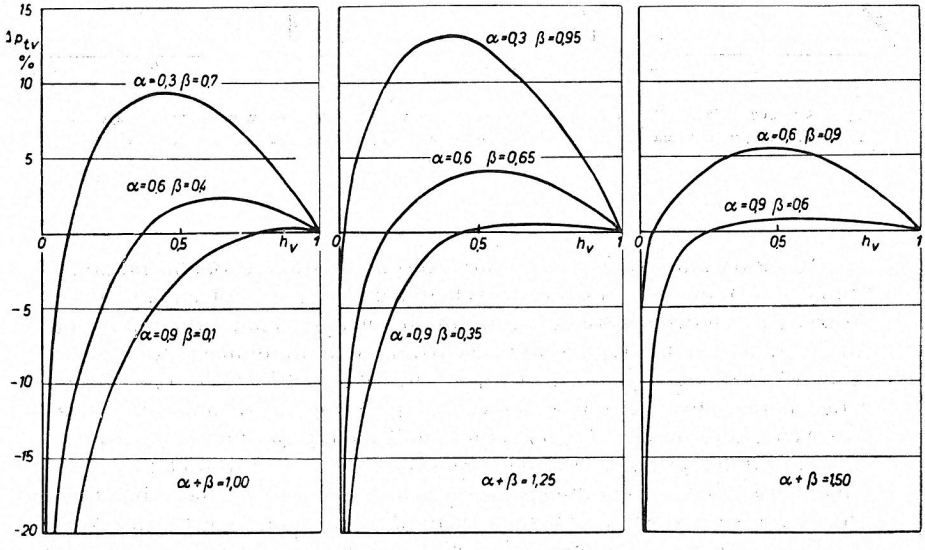
a koja predstavlja iskorištenje varijabilne snage hidroelektrana u



Sl. 77a. Prikaz mogućnosti proizvodnje hidroelektrana za slučaj prikazan u tab. 23.



Sl. 77b. Višak snage termoelektrana (ΔP_{tv}) prema rezultatima bilance u tab. 23.

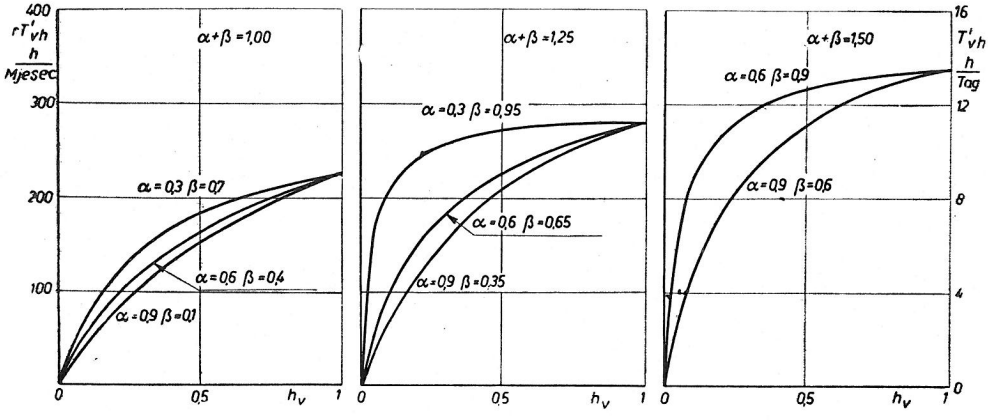


Sl. 78. Pogreška Δp_{tv} (187) u određivanju potrebne snage termoelektrana prema metodi konstantne i varijabilne energije za slučajeve kad se potrebna snaga određuje prema (163) ili (189) za različite vrijednosti $\alpha+\beta$ (9).

h/mjesec. Uvodeći tu veličinu, kao i omjer h_v u nejednadžbu dobit ćemo da se pogreške prikazane na sl. 78 pojavljuju kad je

$$rT_{vh} < \frac{1}{2} rt_v \frac{(\alpha+\beta)\, t_{tv\max} h_v}{t_{tv\max} - \frac{1}{2} t_v (\alpha+\beta)(1-h_v)} \tag{192}$$

Izraz na desnoj strani možemo označiti kao graničnu vrijednost rT'_{vh}, pa se pogreške pojavljuju kad je $rT_{vh} < rT'_{vh}$. Na sl. 79 prikazana je ovisnost veličine rT'_{vh} o h_v.



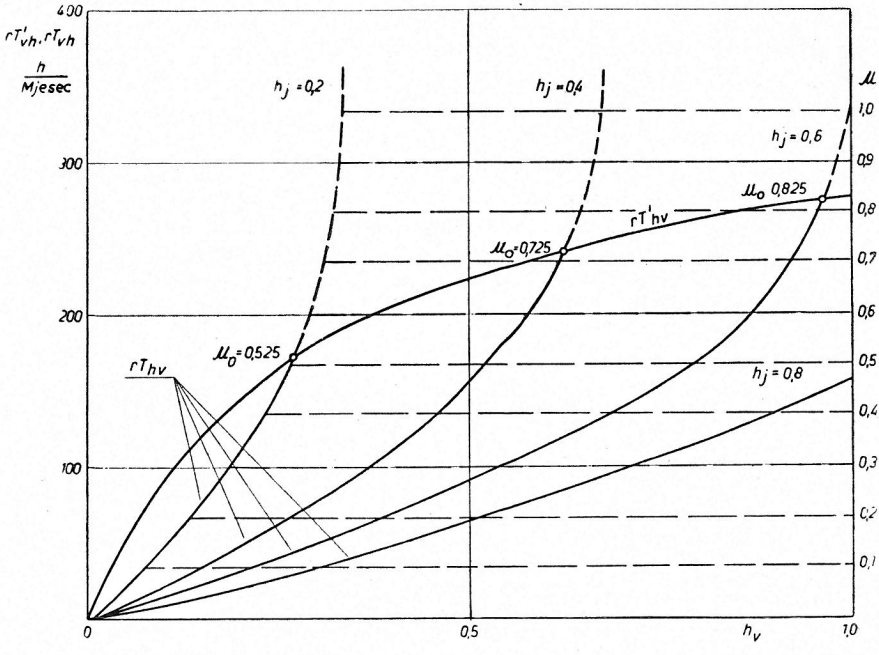
Sl. 79. Ovisnost veličine rT'_{vh} definirane desnom stranom izraza (192) o omjeru između raspoložive varijabilne energije hidroelektrana i potrebne varijabilne snage (h_v) za različite vrijednosti $\alpha + \beta$ (9).

Uspoređujući sl. 78 i sl. 79 možemo analizirati, u općim linijama, prilike u sistemu koje utječu na veličinu grešaka. U doba malih voda proizvodnja hidroelektrana, koje imaju makar male akumulacione bazene (a ogromna većina hidroelektrana ima akumulacione bazene, pa makar i sa trajanjem pražnjenja od nekoliko sati), može se koncentrirati u razdoblje velikih opterećenja, pa se može računati da će se vrlo veliki dio ukupne proizvodnje hidroelektrana moći ostvariti u vidu varijabilne energije. Prema tome veličina h_v — već u elektroenergetskim sistemima s manjim postotkom hidroenergije — neće biti tako mala da bismo došli u područje velikih negativnih pogrešaka. Ako, na primjer, s h_j označimo udio hidroenergije u ukupnoj godišnjoj proizvodnji, s ε odnos potreba varijabilne i ukupne energije, s μ odnos minimalne i prosječne mjesečne proizvodnje hidroelektrana, a s e

odnos varijabilne i ukupne moguće proizvodnje u mjesecu minimalne proizvodnje u hidroelektranama, minimalnu relativnu moguću proizvodnju varijabilne energije možemo odrediti iz relacije

$$h_{v\,\min} = h_j \frac{e\,\mu}{\varepsilon} \tag{193}$$

Ako je, na primjer, $e = 0{,}9$, $\mu = 0{,}3$, $\varepsilon = 0{,}3$, a $h_j = 0{,}2$, bit će $h_{v\,\min} = 0{,}18$. Prema tome, i uz 20% hidroenergije $h_{v\,\min}$ je visok, pa će u većini praktičkih slučajeva biti izbjegnute velike negativne pogreške (sl. 78). Kad se radi o većem procentu hidroenergije, područje u kojem se mogu pojaviti pogreške znatno je uže, pa u obzir dolaze samo pogreške za veće h_v. Tako, na primjer, za $h_j = 0{,}60$, a uz iste pretpostavke kao gore, pogreška se može javiti između $h_v = 0{,}54$ i $h_v = 1{,}00$. Pri vodama većim od minimalnih, rast će količina varijabilne energije, a smanjivat će se raspoloživa snaga P_{hv} radi istodobnog povećanja konstantne energije. Koliko će tada biti moguće iskorištenje T_{vh} snage P_{vh} ovisi o instaliranoj snazi akumulacionih hidroelektrana



Sl. 80. Ovisnost veličine rT'_{vh} definirane desnom stranom izraza (192) i veličine rT_{vh} (191) o omjeru između raspoložive varijabilne energije hidroelektrana i potrebne varijabilne energije (h_v) za različite udjele hidroenergije u ukupnoj godišnjoj proizvodnji (h_j) za $\alpha + \beta = 1{,}25$ i za $\alpha = 0{,}6$. Pogreška Δp_{tv} u određivanju potrebne snage termoelektrana nastaje kad je $rT_{vh} < rT'_{vh}$ (192).

i o udjelu varijabilne energije u ukupnoj proizvodnji hidroelektrana, ali se može tvrditi da će trajanje iskorištenja postajati sve veće s povećanjem mogućnosti proizvodnje hidroelektrana dok ne dostigne vrijednost t_{vh}, koje je najveće moguće vrijeme iskorištenja; a tada je postignut i najveći h_v. Daljnjim povećanjem moguće proizvodnje hidroelektrana ostaje trajanje iskorištenja varijabilne snage nepromijenjeno, dok udio h_v postaje sve manji. Radi ilustracije gore opisanih promjena, na sl. 80 prikazana je ovisnost rT'_{vh} o h_v prema sl. 79 za $\alpha = 0{,}6$ i $\beta = 0{,}65$, te također rT_{vh} u ovisnosti o h_v, i to za udio hidroenergije $h_j = 0{,}2$, 0,4, 0,6 i 0,8. Pretpostavljeno je dalje, da je instalirana snaga hidroelektrana tolika, da trajanje iskorištenja maksimalne snage hidroelektrana iznosi 4000 h/god. Tok krivulje T_{vh} prikazan je na temelju pretpostavke da od ukupne proizvodnje pri $\mu = 0{,}3$ udio varijabilne energije iznosi $e = 0{,}9$, dok za $\mu = 1{,}0$ iznosi $e = 0{,}50$ s tim da se e postepeno smanjuje s povećanjem μ.

Promotrimo slučaj kad je $h_j = 0{,}4$. Veličina rT_{vh} je manja od rT'_{vh} sve do $\mu_o = 0{,}725$ do kad je ispunjena nejednadžba (192), pa u tom području može doći do pogreške. Za μ veće od μ_o nije ispunjena nejednadžba (192), pa se stvarno potrebna snaga termoelektrana ne određuje prema relaciji (189). Dakle, u relativno uskom području vrijednosti μ dolazi do pogreške, i to već za nešto veći postotak hidroenergije u sistemu i za nešto veći β samo u područjima gdje se javlja pozitivna pogreška. Ta pozitivna pogreška daje nešto lošiju sliku o prilikama, ali ona je — i s obzirom na veličinu i s obzirom na učestalost pojave — tolika da ne može imati utjecaja na rezultat analize prilika u duljem vremenskom razdoblju.

Međutim, ako treba tačnije određivati potrebnu snagu termoelektrana u varijabilnom dijelu dijagrama, za pojedini slučaj može se postupiti na način prikazan na sl. 76 ili sl. 77.

PETO POGLAVLJE

KARAKTERISTIKE MOGUĆNOSTI HIDROELEKTRANA I OPTEREĆENJA TERMOELEKTRANA U KOMBINIRANOM ELEKTROENERGETSKOM SISTEMU

1. Karakteristične godine kao osnova za elektroenergetske analize

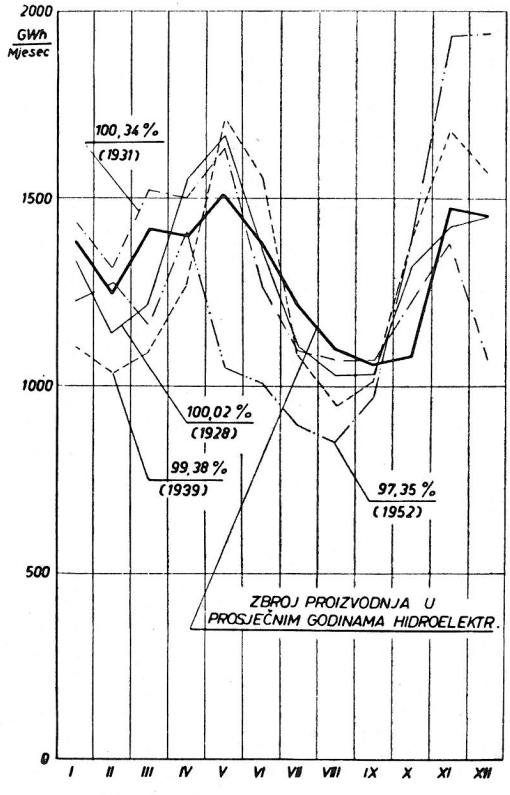
a) Karakteristična srednja godina

U nekim slučajevima kao osnova za analizu prilika u promatranoj hidroelektrani i u elektroenergetskom sistemu uzima se srednja godina, koja treba da posluži kao baza za ekonomsko-energetska razmatranja. Za srednju godinu odabire se takva realna godina, koja ima srednji godišnji protok (ili godišnju moguću proizvodnju) približno jednak srednjem dugogodišnjem protoku (ili srednjoj mogućoj proizvodnji) duljeg niza godina, te koja ima takav raspored protoka u toku tako odabrane realne godine da što bolje odgovara najčešćem rasporedu. U tako odabranoj srednjoj godini normalno se gube ekstremi, pa se s jedne strane, kao posljedica takvog izbora, dobivaju manji preljevi od onih koje stvarno treba očekivati, dok se s druge strane dobiva kao rezultat da je u takvoj godini — koja treba da posluži kao reprezentativna za energetsko-ekonomske analize — potrebno u manjoj mjeri angažirati manje ekonomične termoelektrane, nego što će biti u stvarnoj eksploataciji.

Teško se, dakle, može govoriti o reprezentativnosti takve godine.

Međutim, ako smo i prihvatili tako odabranu srednju godinu za pojedinu hidroelektranu, postavlja se pitanje kako odrediti moguću proizvodnju i raspored te proizvodnje tokom godine u elektro-energetskom sistemu s više hidroelektrana. Prihvaćanjem srednje godine kao reprezentativne za pojedinu hidroelektranu, dolazimo na pomisao da bismo srednju godinu u elektroenergetskom sistemu kao cjelini mogli dobiti zbrajanjem srednjih godina pojedinih hidroelektrana. U tako određenoj srednjoj godini elektroenergetskog sistema sudjeluje svaka hidroelektrana s mogućom proizvodnjom, koja je vrlo blizu dugogodišnjoj prosječnoj proizvodnji, pa je s tog stanovišta tako određena srednja godina ispravno odabrana. S gledišta rasporeda proizvodnje tokom godine, takav izbor srednje godine ne može zadovoljiti, jer se opet gube ekstremi. Na sl. 81 prikazane su, primjera radi, mjesečne

proizvodnje u srednjoj godini koja je određena kao suma srednjih godina pojedinih hidroelektrana u nekom elektroenergetskom sistemu, te mjesečne proizvodnje u četiri realne godine, koje su po godišnjoj proizvodnji najbliže prosječnoj dugogodišnjoj proizvodnji. Svi podaci odnose se na isti tridesetogodišnji period. Moguće mjesečne proizvodnje u te četiri godine odgovaraju stvarnim mjesečnim proizvodnjama, jer je takve proizvodnje bilo moguće i ostvariti (s predviđenim hidroelektranama), budući da je uzeta u obzir vremenska istodobnost pojava.



Sl. 81. Moguće mjesečne proizvodnjie u srednjoj godini određenoj kao suma proizvodnje u srednjim godinama pojedinih hidroelektrana i moguće mjesečne proizovdnje u četiri srednje godine cijelog elektroenergetskog sistema (uz krivulje je naveden postotak od prosječne godišnje proizvodnje u svakoj od četiri godine).

Drugo rješenje je izbor jedne te iste realne godine za sve hidroelektrane u sistemu, pa će tada biti osiguran realniji prikaz rasporeda proizvodnje tokom godine u elektroenergetskom sistemu kao cjelini. Takvo rješenje, međutim, onemogućit će usporedbu među pojedinim

Tab. 24. Odstupanja godišnjih proizvodnja od 30-godišnjeg prosjeka pojedinih hidroelektrana u dvije realne godine, koje su za elektroenergetski sistem kao cjelinu po godišnjoj proizvodnji najbliže srednjoj godini.

Hidro-elektrane	30-godišnji prosjek GWh	1928. godina		1939. godina	
		Godišnja proiz-vodnja GWh	Odstupanje od prosjeka %	Godišnja proizvodnja GWz	odstupanje od prosjeka %
HE A	478,5	397,0	—17,05	484,6	+ 1,27
HE B	1361,1	1141,0	—16,17	1379,2	+ 1,33
HE C	1963,0	2114,1	+ 6,61	2090,6	+ 5,43
HE D	1792,9	1772,0	— 1,17	1690,2	—5,73
HE E	365,4	395,8	+ 8,32	336,1	—8,02
HE F	442,9	440,6	— 0,52	412,7	—6,82
HE G	680,6	524,0	—23,00	668,9	—1,72
HE Z	783,9	685,9	—12,61	831,3	+ 6,05
Sve hidro-elektrane	15551,9	15555,2	+ 0,02	15456,0	—0,62

hidroelektranama. Godišnja proizvodnja pojedine hidroelektrane u odabranoj realnoj godini može se, naime, znatnije razlikovati od dugogodišnje proizvodnje te hidroelektrane, pa će promatrana hidroelektrana slučajno steći prednost, odnosno biti oštećena u usporedbi s ostalim hidroelektranama. U tabeli 24 navedeni su podaci za nekoliko hidroelektrana iz istog elektroenergetskog sistema za dvije realne godine, koje su po ukupnoj proizvodnji svih hidroelektrana najbliže tridesetogodišnjem prosjeku.

Prema tome, i prvi i drugi način određivanja karakteristične srednje godine u elektroenergetskom sistemu kao cjelini daje iskrivljenu sliku o prilikama, koje možemo očekivati, pa to može dovesti do pogrešnih zaključaka.

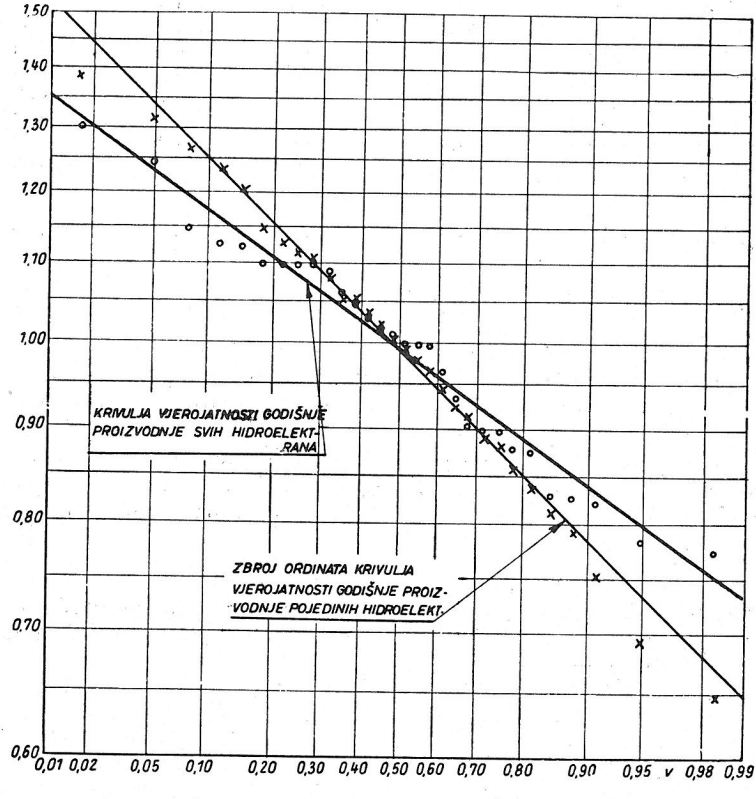
b) Karakteristična sušna godina

Kad se srednja godina — kako je gore definirana — uzme kao osnova za ekonomsko-energetske analize, neophodno je razmatrati prilike u sušnoj godini, da bi se utvrdila mogućnost zadovoljenja potreba i odredila potreba izgradnje novih energetskih postrojenja.

Polazi se od sušne godine s mogućom proizvodnjom koja se, na primjer može osigurati u 90% slučajeva. I sada se može postupiti na dva načina.

Prema prvom načinu odredi se za svaku hidroelektranu godišnja proizvodnja koja se može osigurati, na primjer, u 90% slučajeva, pa se zbrajanjem tako određenih proizvodnji dobiva proizvodnja u sušnoj

godini elektroenergetskog sistema. Tako određena godišnja proizvodnja hidroelektrana cijelog sistema manja je od stvarne proizvodnje hidroelektrana, koja je osigurana u 90% slučajeva, jer se vrlo sušna godina ne pojavljuje istodobno na svim vodotocima. Ilustracije radi, na sl. 82 prikazana je krivulja vjerojatnosti godišnje proizvodnje hidroelektrana u nekom elektroenergetskom sistemu u usporedbi s krivuljom koja prikazuje zbroj po ordinatama krivulja vjerojatnosti godišnje proizvodnje za svaku hidroelektranu posebno. Druga od spomenutih

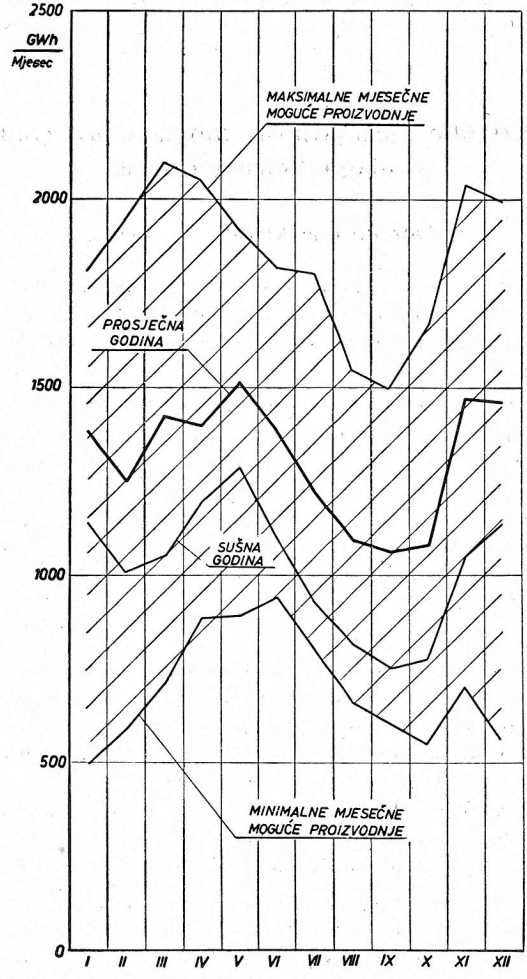


Sl. 82. Krivulje vjerojatnosti godišnje proizvodnje hidroelektrana u jednom elektroenergetskom sistemu.

krivulja određena je, dakle, uz pretpostavku da se u svim hidroelektranama istodobno pojavljuju godine iste vlažnosti, odnosno iste sušnosti. Razlike između tih dviju krivulja su najveće za slučaj najvećih i za slučaj najmanjih godišnjih proizvodnji. Tako, na primjer, u najsušnijoj godini sistema kao cjeline imamo godišnju proizvodnju koja je jednaka 77,3% od prosječne godišnje proizvodnje, dok bi u slučaju kad bi se najsušnije godine na svim vodotocima pojavile istodobno

godišnja proizvodnja iznosila tek 64,7% od prosječne godišnje proizvodnje.

Prema drugom načinu određivanja karakteristične sušne godine, za sve hidroelektrane polazimo od iste godine, u kojoj se može u sistemu



Sl. 83. Moguće mjesečne proizvodnje u srednjoj i sušnoj godini, kao i najveće i najmanje moguće mjesečne proizvodnje u 30-godišnjem razdoblju u hidroelektranama jednog elektroenergetskog sistema.

kao cjelini postići proizvodnja određene vjerojatnosti (na primjer, 90%). Međutim, sada imamo istu situaciju kao pri određivanju srednje godine. Pojedine hidroelektrane pokazuju se, naime, znatno povoljnije, a druge mogu biti prikazane vrlo nepovoljnim.

U pogledu rasporeda proizvodnje tokom godine imamo slične prilike kao i u slučaju srednje godine.

Možda još bolju sliku o nereprezentativnosti srednje i sušne godine prikazuje sl. 83, na kojoj su prikazane srednja i sušna godina određene kao zbroj srednjih i sušnih godina pojedinih hidroelektrana, kao i najveće i najmanje mjesečne proizvodnje u promatranom 30-godišnjem razdoblju.

2. Krivulje vjerojatnosti moguće proizvodnje i snaga hidroelektrana

a) Određivanje krivulje vjerojatnosti

Saznanja o prilikama u elektroenergetskom sistemu dobivena na osnovu odabrane srednje i sušne godine ne pokazuju, dakle, prave odnose ni u pogledu mogućnosti ni u pogledu rasporeda proizvodnje tokom godine.

Nemoguće je, naime, odabrati neke karakteristične godine iz niza godina koje stoje na raspolaganju. Ako bi to i bilo moguće načiniti za jednu od hidroelektrana, nemoguće je to načiniti za cijeli elektroenergetski sistem uz uvjet da se sačuvaju sve karakteristike proizvodnje i sistema i hidroelektrana, te da uz to bude moguća međusobna usporedba hidroelektrana. Da bi se to postiglo, trebalo bi vjerojatno odabrati veći broj karakterističnih godina, pa da ipak ne budemo sigurni da smo odabrali baš karakteristične godine, koje ispunjavaju sve uvjete.

Radi svega toga treba odbaciti analizu samo nekih izabranih godina i prijeći na razmatranje niza godina, i to istog niza za sve hidroelektrane u sistemu. Na taj način uzimaju se u obzir sve situacije koje su se pojavile u pojedinim hidroelektranama i u sistemu kao cjelini i koje, vjerojatno, ako se radi o podacima za dulji niz godina, možemo očekivati u budućnosti. U duljem nizu godina uključena su i razdoblja vrlo velike vlažnosti, kao i razdoblja velikih suša, pa se na taj način dobivaju podaci i o ekstremnim mogućim proizvodnjama.

Osim toga, razmatranjem situacija koje su se pojavljivale u istom času u nizu hidroelektrana, dobivaju se i podaci o međusobnoj energetskoj dopuni među hidroelektranama i vodotocima, što je nemoguće sa sigurnošću odrediti iz odabranih karakterističnih godina.

Moglo bi se s opravdanjem reći da je nemoguća analiza prilika na osnovu vrlo velikog broja podataka iz niza godina. Ako, naime, promatramo, na primjer, samo mjesečne mogućnosti proizvodnje u nizu od 30 godina, dolazimo do 360 podataka. Taj broj postaje znatno veći kad prijeđemo na određivanje mogućnosti proizvodnje varijabilne i konstantne energije, te na određivanje maksimalnih i konstantnih snaga (poglavlje II 3 i II 4).

Međutim, nije potrebno analizu uvijek provoditi sa svim podacima, već je dovoljno na osnovu tih podataka odrediti krivulje vjerojatnosti bilo moguće proizvodnje, bilo drugih potrebnih veličina, pa analizu provesti na osnovu tih krivulja.

Postoji niz metoda [3] za određivanje krivulja vjerojatnosti pojave protoka, koje se mogu upotrijebiti i za određivanje krivulja vjerojatnosti moguće proizvodnje hidroelektrana. Metoda Gibrata ([25], [26] i [27]) je jednostavna za primjenu, jer ne traži znatnih izračunavanja. Poređaju se, naime, sve vrijednosti po veličini, bez obzira na njihovo kronološko pojavljivanje. Veličine proizvodnji nanose se na ordinatu (logaritamska skala) prema mjestu »*i*« u nizu proizvodnji. Tu vjerojatnost v_i, koja je određena mjestom u nizu, određujemo iz relacije

$$v_i = \frac{2i-1}{2n} \tag{194}$$

gdje je n broj članova u nizu. Skala za vjerojatnosti je određena prema vrijednosti integrala

$$v = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int e^{-\frac{x^2}{2}} dx \tag{195}$$

koje se nanose na apscisi lijevo i desno od vrijednosti 0,50 (sl. 84)

Unošenjem tačaka niza u koordinatni sistem, logaritam-vjerojatnost, moći ćemo tim tačkama u nekim slučajevima aproksimirati pravac. Ako to nije moguće postići, potrebno je smanjivati ordinate svih tačaka za istu konstantnu vrijednost W_0, sve dok se ne postigne takav položaj tačaka da one aproksimiraju pravac. U primjeru na sl. 84 to je postignuto za $W_0 = 20$ GWh. Pomakom tačaka pravca za W_0 prema gore, možemo nacrtati krivulju vjerojatnosti čiji analitički izraz određujemo pomoću integrala (195), ako postavimo da je $x^2/2 = z^2$, gdje je

$$z = a \log (W - W_o) + b \tag{196}$$

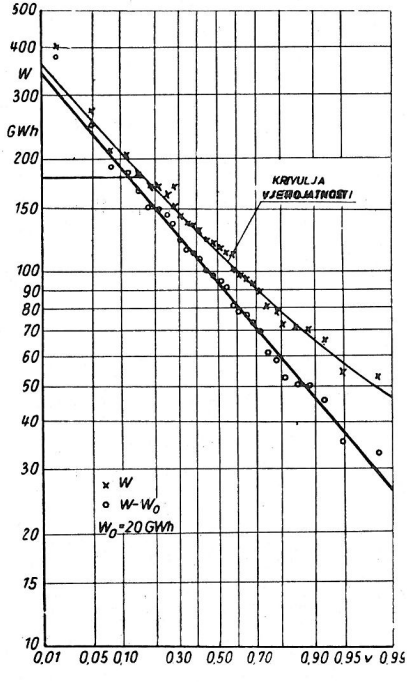
U (196) a i b su konstante koje određujemo iz dvije tačke na pravcu pomaknutom za W_0, za koje možemo iz dijagrama na sl. 84 očitati W i vjerojatnost v, a pomoću koje određujemo iz tabela vrijednost za x (195), odnosno za z.

Prenošenjem tačaka krivulje na sl. 84 lako je doći do krivulje vjerojatnosti u koordinatnom sistemu s linearnim skalama (sl. 85).

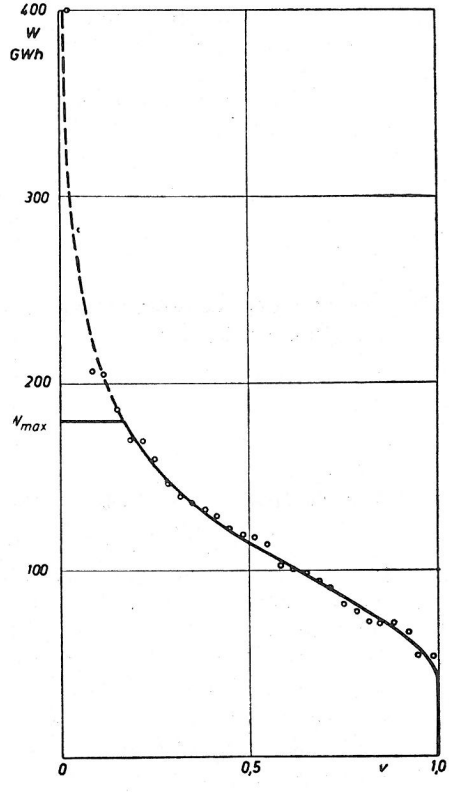
Na opisani način možemo odrediti krivulje vjerojatnosti dekadnih ili mjesečnih proizvodnji, kako za svaki mjesec posebno tako i za cijelu

godinu. Budući da se radi o mogućoj proizvodnji hidroelektrane čija je maksimalna snaga ograničena, ograničena je i maksimalna moguća proizvodnja. Krivulja vjerojatnosti za $W > W_{max}$ nema, dakle, značenja.

Treba napomenuti da je moguća proizvodnja, koja je služila za određivanje krivulje na sl. 84, izračunata bez obzira na maksimalnu snagu hidroelektrana.



Sl. 84. Primjer određivanja krivulje vjerojatnosti moguće proizvodnje hidroelektrane u koordinatnom sistemu logaritam — vjerojatnost.



Sl. 85. Krivulja vjerojatnosti sa sl. 84 u koordinatnom sistemu s linearnim skalama na ordinati i na apscisi

Međutim, nas ovdje više interesiraju mogućnosti proizvodnje u sistemu kao cjelini. Ako želimo da odredimo mogućnost proizvodnje u sistemu, u nekoj dekadi ili u nekom mjesecu (na primjer, u februaru 1956. godine), zbrojit ćemo proizvodnje svih hidroelektrana, koje bi se mogle ostvariti u toj dekadi ili mjesecu kad bi sve promatrane hidroelektrane bile tada izgrađene. Prema tome, potrebno je prilikom razmatranja prilika u sistemu, definirati i stanje izgradnje hidroelektrana,

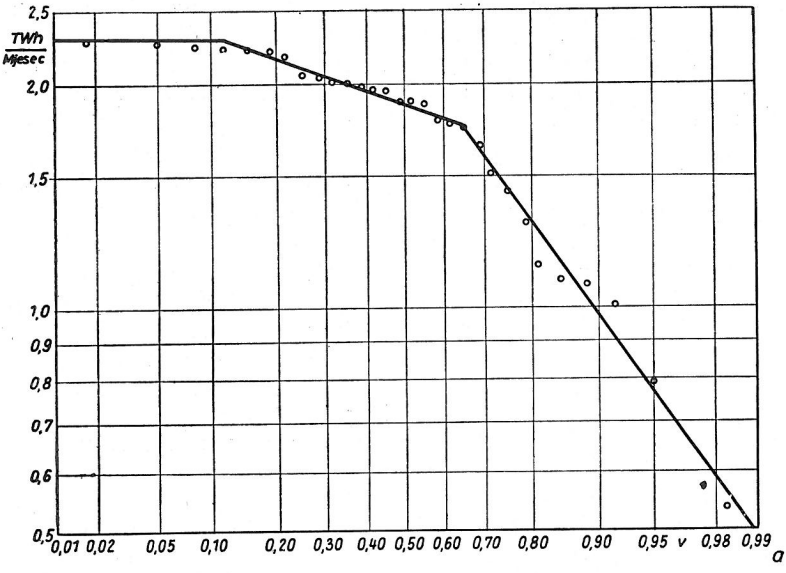
koje se promatra. Zbrojevi mogućih proizvodnji, koje su bile istodobno ostvarive u svim hidroelektranama sistema u pojedinim vremenskim razdobljima (dekada ili mjesec), predstavljaju polazne podatke za određivanje krivulja vjerojatnosti moguće proizvodnje hidroelektrana u sistemu kao cjelini.

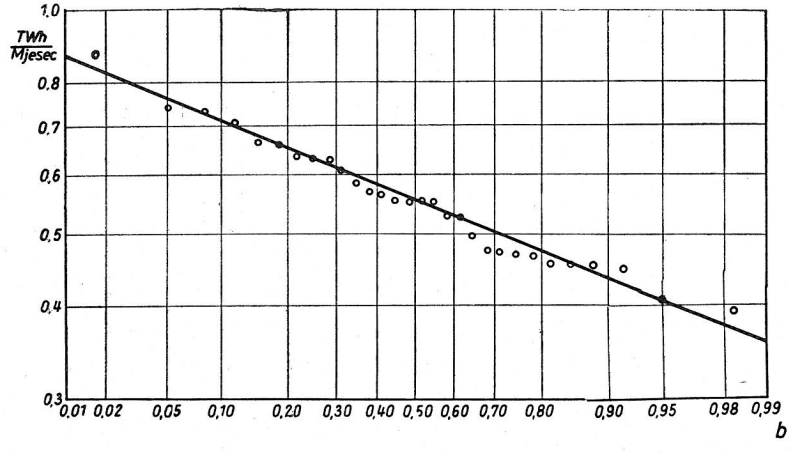
Za razliku od krivulja vjerojatnosti jedne hidroelektrane, kad smo razlikovali slučajeve u kojima je moguća proizvodnja hidroelektrane bila manja i slučajeve u kojima je moguća proizvodnja postigla maksimalnu vrijednost, kod krivulja vjerojatnosti moguće proizvodnje cijelog elektroenergetskog sistema treba razlikovati tri slučaja. Prvi, kad se u svim hidroelektranama može proizvesti maksimalno moguća proizvodnja, što je u većem sistemu s hidroelektranama sa sezonskim akumulacionim bazenima vrlo rijetka pojava. Drugi slučaj imamo, kad većina hidroelektrana u sistemu može proizvesti maksimalno moguću proizvodnju u promatranom vremenskom razdoblju, dok je treći slučaj, kad sve hidroelektrane ili ogromna većina hidroelektrana mogu proizvesti manje od maksimalno moguće proizvodnje. U prvom slučaju krivulju vjerojatnosti predstavlja horizontalan pravac, dok su u druga dva slučaja krivulje vjerojatnosti (u koordinatnom sistemu vjerojatnost-logaritam) prikazane s dva pravca različitih nagiba (sl. 86) ili dvjema krivuljama, koje se sijeku u tački koja predstavlja granicu između drugog i trećeg slučaja. Različiti nagibi pravaca, odnosno različiti tok krivulja, posljedica su ograničenja moguće proizvodnje u pojedinim hidroelektranama radi ograničene maksimalne snage, odnosno ograničene veličine izgradnje.

Na isti način možemo odrediti krivulju vjerojatnosti proizvodnje konstantne energije, koju za svaku hidroelektranu možemo odrediti prema poglavlju II 3 odnosno II 4. Zbrajanjem tih proizvodnja dolazimo do proizvodnje konstantne energije u sistemu. Normalno se događa da se sa smanjenjem ukupne proizvodnje smanjuje i proizvodnja konstantne energije, pa će i opadajući niz proizvodnji konstantne energije po momentu pojavljivanja odgovarati i opadajućem nizu ukupnih mogućih proizvodnji. Međutim, ako se to i ne dogodi u svim slučajevima, neće doći do veće pogreške, ako krivulju vjerojatnosti odredimo prema nizu opadajućih proizvodnji konstantne energije, ne vodeći računa o istodobnosti pojava ukupne moguće proizvodnje i proizvodnje konstantne energije. Razlika između ta dva redoslijeda za prilike u jednom mjesecu za promatrano stanje izgradnje hidroelektrana u nekom elektroenergetskom sistemu prikazana je na sl. 87. Treba napomenuti da i sada mogu nastupiti tri slučaja, kao i kod krivulja vjerojatnosti ukupne moguće proizvodnje. Za prvi slučaj horizontalni pravci padaju zajedno.

Istu situaciju imamo pri određivanju krivulje vjerojatnosti maksimalnih snaga (sl. 88).

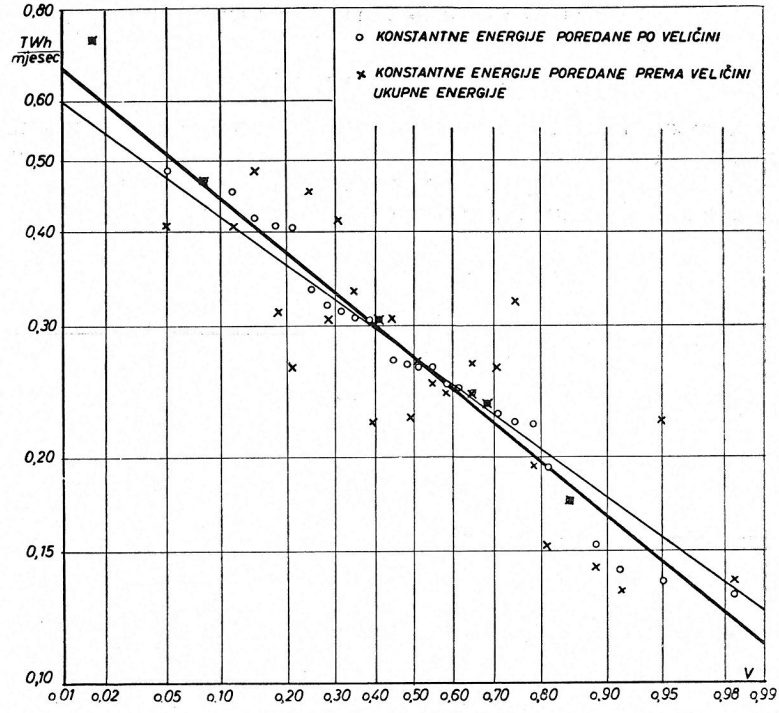
Određivanjem krivulja vjerojatnosti ukupne moguće proizvodnje, konstantne energije i maksimalne snage hidroelektrana, definirane



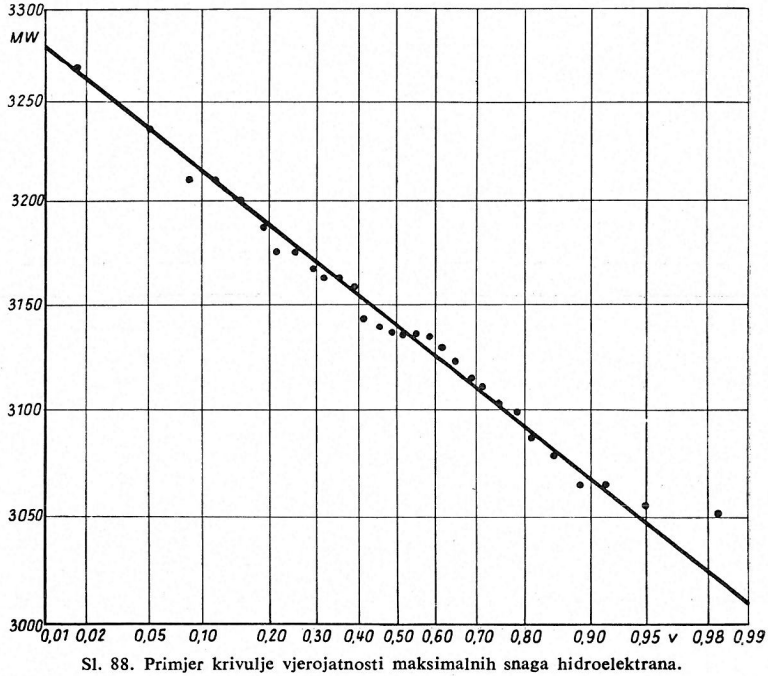


Sl. 86. Primjeri krivulja vjerojatnosti mogućih mjesečnih proizvodnji u hidroelektranama sistema: (*a*) za vlažni i (*b*) za sušni mjesec.

su sve potrebne veličine koje karakteriziraju mogućnosti hidroelektrana. Takve krivulje treba odrediti za svaki mjesec, bilo da polazimo od dekada ili mjeseci. Takve krivulje prikazuju sada sve moguće situacije koje možemo očekivati u jednom mjesecu.



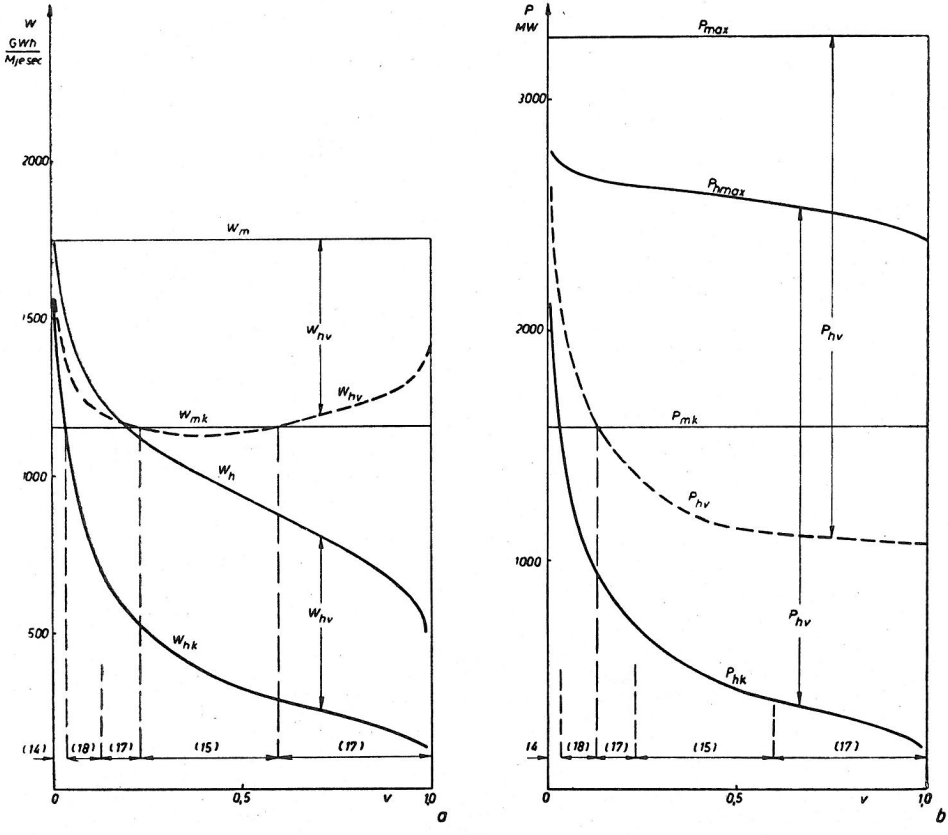
I. 87. Primjer aproksimacije krivulje vjerojatnosti mjesečne proizvodnje konstantne energije. (1) redolijed po veličini mjesečnih proizvodnja konstantne energije, (2) redoslijed mjesečnih proizvodnja konstantne energije prema veličini mogućih mjesečnih proizvodnja.



Sl. 88. Primjer krivulje vjerojatnosti maksimalnih snaga hidroelektrana.

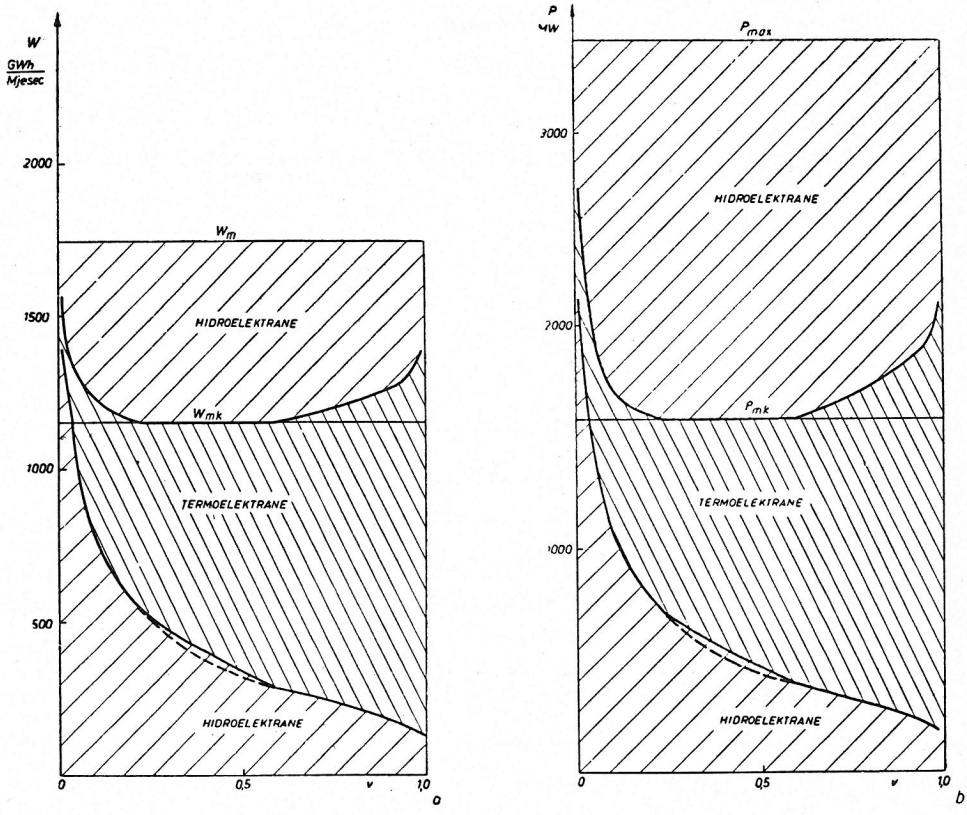
b) Upotreba krivulja vjerojatnosti

Uspoređivanjem krivulja vjerojatnosti mogućnosti hidroelektrana s potrebama energije i snage, možemo odrediti slučajeve (poglavlje IV 3b) koji se pojavljuju, a prema tome odrediti i iskorištenje mogućnosti hidroelektrana, kao i potrebnu dopunu termoelektrana.



Sl. 89. Mogućnosti proizvodnje hidroelektrana (a) i snage hidroelektrana (b), te potrebe energije (a) i snage (b) u nekom mjesecu i u nekom elektroenergetskom sistemu. Brojke u zagradama označavaju slučajeve na sl. 70.

Na sl. 89 prikazane su mogućnosti hidroelektrana u dva dijagrama (posebno energije, a posebno snage). Potrebe su prikazane horizontalnim pravcima, jer promatramo prilike u sistemu u određenom mjesecu za određeni konzum, a on nije ovisan o prilikama u hidroelektranama. Podaci za svaku vjerojatnost prikazuju jednu od mogućih situacija koja se može pojaviti u promatranom sistemu i u promatranom



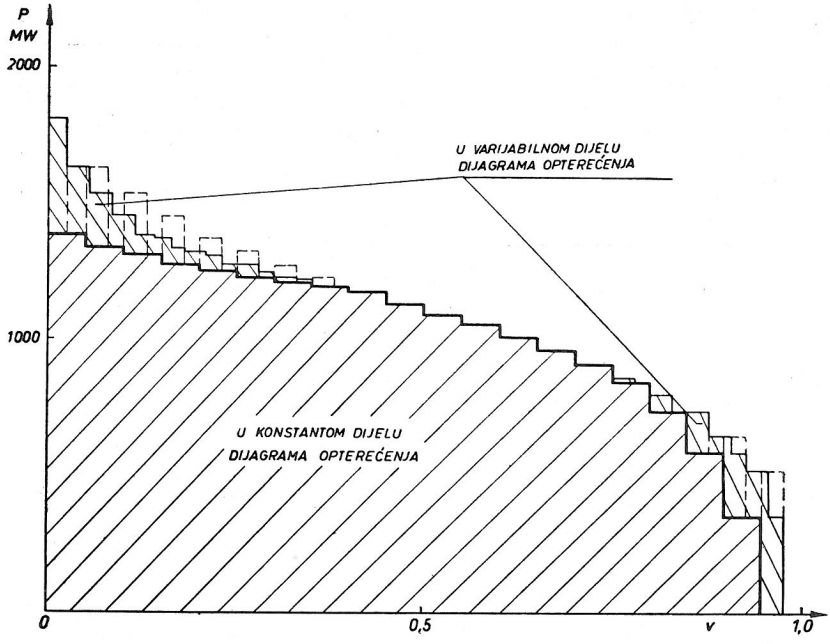
Sl. 90. Iskoristiva energija hidroelektrana i potrebna proizvodnja termoelektrana (*a*), te iskoristiva snaga hidroelektrana i potrebno opterećenje termoelektrana (*b*) za odnose prikazane na sl. 89.

mjesecu. Na sl. 89 označene su granice unutar kojih se pojavljuju slučajevi navedeni na sl. 70. Koristeći metodu varijabilne i konstantne energije (poglavlje IV 3) određujemo sada iskoristivu proizvodnju i snagu hidroelektrana, te potrebnu proizvodnju i snagu termoelektrana za niz vjerojatnosti, pa na temelju takve analize možemo nacrtati dijagrame na sl. 90. Podaci o snagama i energijama iz takvih dijagrama omogućuju daljnje analize.

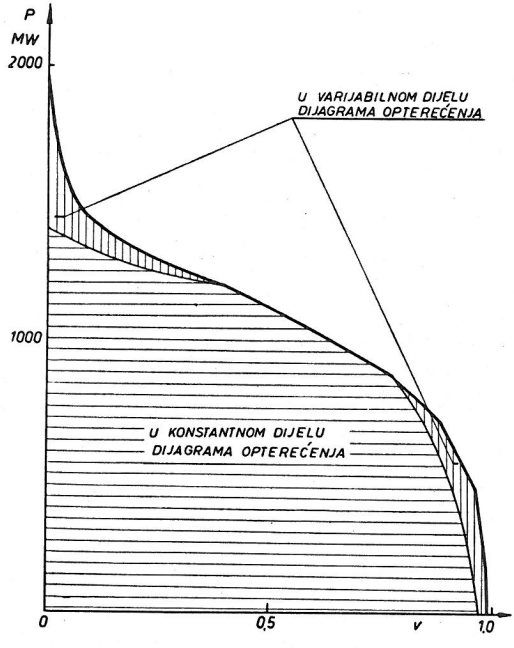
3. Krivulje opterećenja termoelektrana

a) Krivulje trajanja opterećenja termoelektrana

Poznavajući potrebe energije (sl. 90a) i snage (sl. 90b) iz termoelektrana, možemo za niz situacija nacrtati krivulje trajanja opterećenja termoelektrana. Trajanje konstantnog opterećenja definirano je već

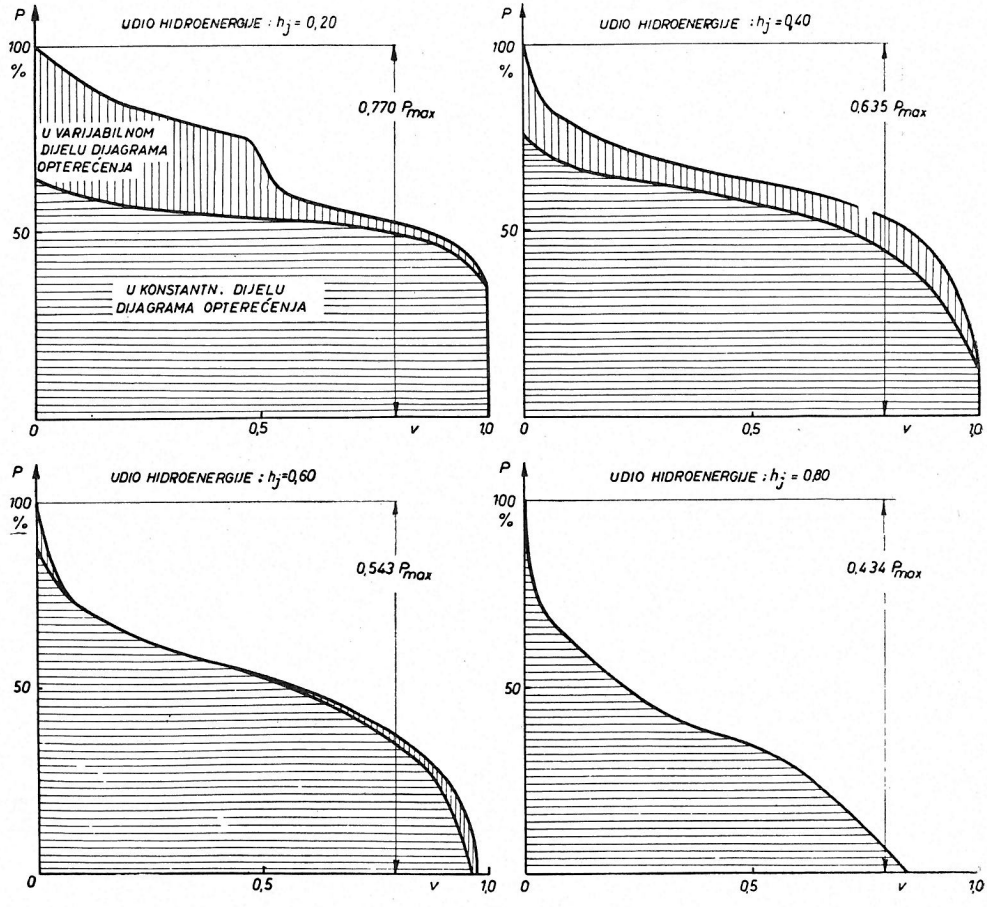


Sl. 91. Primjer određivanja krivulja trajanja opterećenja termoelektrana za prilike prikazane na sl. 89.



Sl. 92. Aproksimirana krivulja trajanja opterećenja termoelektrana za prilike prikazane na sl. 89.

činjenicom da se radi o konstantnom opterećenju, dok se za varijabilni dio proizvodnje može pretpostaviti da se radi o pravokutnom dijagramu opterećenja. Ta pretpostavka je tim više dozvoljena što se radi o razmatranju većeg broja situacija određenih krivuljama na sl. 90. Na sl. 91 prikazane su krivulje trajanja opterećenja termoelektrana za dvadeset situacija iz krivulja na sl. 90. Situacije odgovaraju vjerojatnostima



Sl. 93. Primjeri godišnjih krivulja trajanja opterećenja termoelektrana za različite udjele hidroenergije (h_j) u ukupnoj proizvodnji u elektroenergetskom sistemu (100% = maksimalna potrebna snaga termoelektrana).

prema izrazu (194), gdje je i redni broj situacije, a n ukupni broj promatranih situacija. Za primjer na sl. 91 imamo $p_1 = 0{,}025$, $p_2 = 0{,}075$ itd. Zbrajanjem trajanja opterećenja dobit ćemo stepeničastu krivulju

koja prikazuje krivulju trajanja opterećenja termoelektrana uz već navedene pretpostavke. Takva krivulja predstavlja aproksimaciju krivulje trajanja opterećenja termoelektrana. Pomoću te krivulje, a uzimajući u obzir opterećenja termoelektrana uz vrlo male i vrlo velike vjerojatnosti, može se nacrtati krivulja trajanja opterećenja termoelektrana (sl. 92), na kojoj je posebno prikazano opterećenje termoelektrana za pokrivanje konstantnog, a posebno za pokrivanje varijabilnog dijela dijagrama opterećenja.

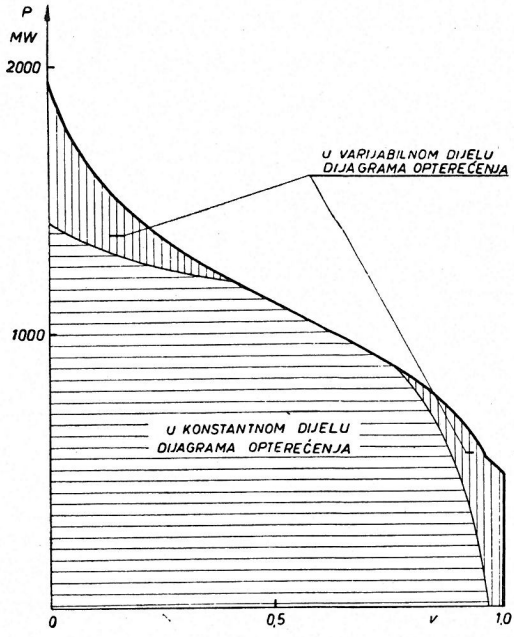
Na sl. 92 prikazana je krivulja trajanja za jedan mjesec, a zbrajanjem mjesečnih krivulja po apscisama dolazimo do godišnje krivulje trajanja opterećenja.

Da bi se pokazao utjecaj postotka hidroenergije u ukupnoj proizvodnji sistema, na sl. 93 su prikazane, primjera radi, krivulje trajanja opterećenja termoelektrana u jednom sistemu za udio hidroenergije od 20, 40, 60 i 80%. U svim slučajevima pretpostavljeno je da se radi o hidroelektranama istih karakteristika i s obzirom na raspored protoka i s obzirom na iskorištenje instalirane snage. Uz veći postotak hidroenergije imamo naglije opadanje krivulje trajanja opterećenja termoelektrana, kao i smanjenje proizvodnje termoelektrana u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja. U elektroenergetskom sistemu, na koji se odnose krivulje na sl. 93, velika većina hidroelektrana ima bazene barem s dnevnom akumulacijom. Interesantno je usporediti omjer maksimalno potrebne snage termoelektrana za različite udjele hidroenergije i maksimalnog godišnjeg opterećenja (sl. 93). Za slučaj kad udio hidroenergije iznosi 20% potrebna maksimalna raspoloživa snaga termoelektrana iznosi 77,0% od maksimalnog opterećenja, dok za udio hidroenergije od 80% maksimalna raspoloživa snaga termoelektrana treba da bude 43,4% od maksimalnog opterećenja. Dakle, i pored toga što je maksimalna snaga hidroelektrana porasla za četiri puta, potrebna raspoloživa snaga termoelektrana se smanjuje tek na 56% od potrebne snage.

Kako je već spomenuto, u elektroenergetskom sistemu, koji je promatran kao primjer, većina hidroelektrana imaju akumulacione bazene s dnevnom akumulacijom, pa varijabilna energija iznosi 54,3% od ukupne moguće proizvodnje hidroelektrana. Uz pretpostavku da su sve hidroelektrane, koje nemaju sezonske akumulacione bazene, protočne hidroelektrane, udio varijabilne energije iznosit će 39,7% od ukupne moguće proizvodnje hidroelektrana. Tada će nešto porasti potrebna raspoloživa maksimalna snaga termoelektrana, pa će to povećanje iznositi 4,9% za udio hidroenergije od 20%, a 8,2% za udio hidroenergije od 80%.

b) Sređeni dijagrami dnevnih maksimalnih opterećenja termoelektrana

U nekim slučajevima nas ne interesira trajanje opterećenja, već samo pojava maksimalnog opterećenja u radnom danu. Takav sređeni



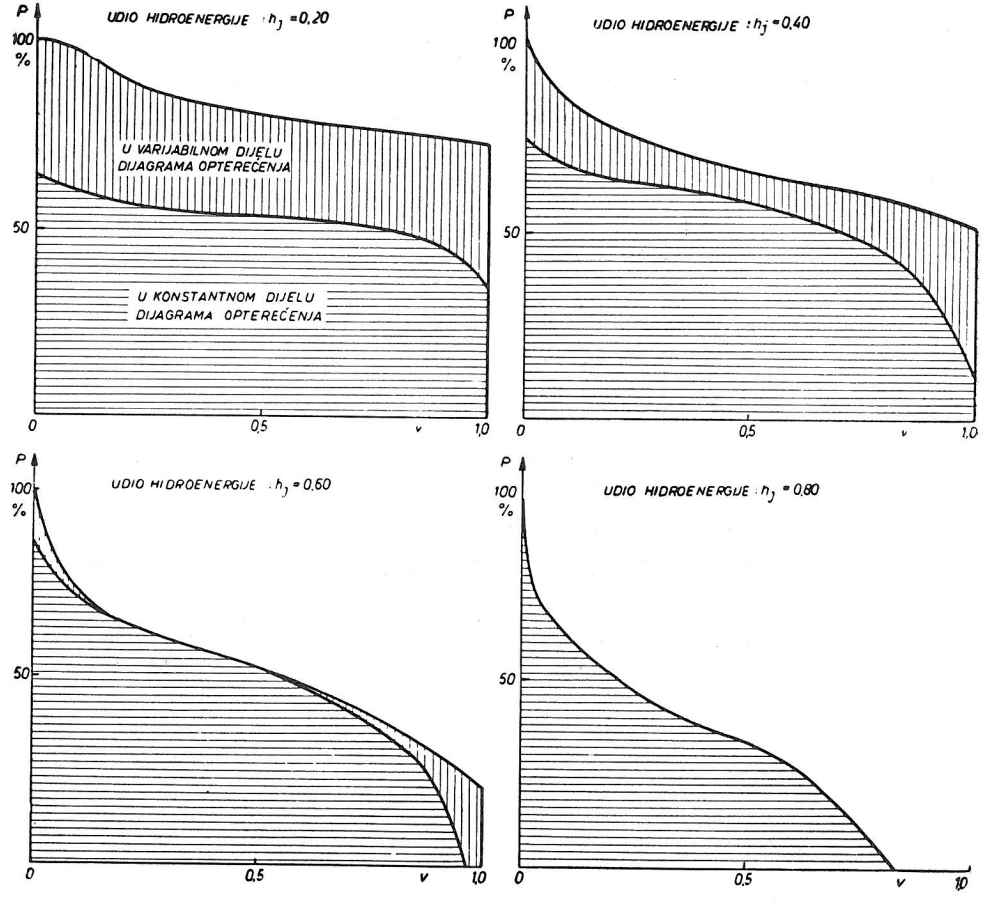
Sl. 94. Sređeni dijagram maksimalnih dnevnih opterećenja termoelektrana za prilike prikazane na sl. 89.

dijagram, u kojemu su maksimalna dnevna opterećenja poredana po veličini, prikazan je na sl. 94, a vrijedi za prilike na sl. 89.

Treba naglasiti da u sređenom dijagramu dnevnih maksimalnih opterećenja nisu uzeta u obzir maksimalna opterećenja u neradnim danima, pa on može poslužiti i za analizu mogućnosti godišnjeg remonta termoelektrana, za koji je potrebno i nekoliko sedmica, kao i za određivanje potrebnog smanjenja opterećenja kod potrošača radi pomanjkanja snage, jer se u takvim slučajevima (poglavlje VI) radi o potrošačima koji ne mogu raditi samo u neradnom danu, a da u radnom danu budu potpuno ili djelomično obustavljeni.

Određivanje godišnjeg sređenog dijagrama dnevnih maksimalnih opterećenja vrši se na isti način kao i godišnja krivulja trajanja opterećenja.

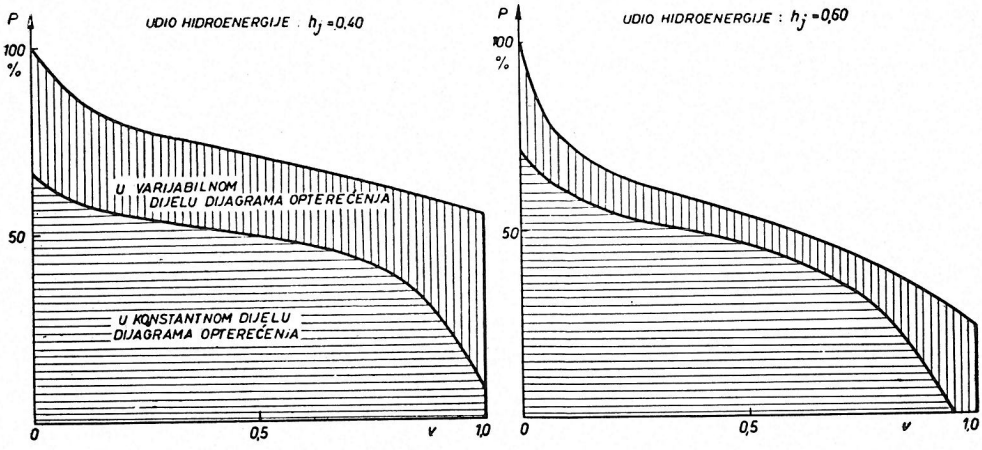
Na sl. 95 prikazani su sređeni dijagrami dnevnih maksimalnih opterećenja termoelektrana za slučajeve za koje su na sl. 93 prikazane krivulje trajanja opterećenja termoelektrana. Za mali udio hidroenergije postoje znatne razlike između krivulja trajanja opterećenja i sređenih dnevnih maksimalnih opterećenja termoelektrana, jer se tada snaga termoelektrana upotrebljava u znatnoj mjeri za pokrivanje varijabilnog dijela dijagrama opterećenja. Za veliki udio hidroenergije



Sl. 95. Primjeri godišnjih sređenih dijagrama maksimalnih dnevnih opterećenja termoelektrana za različite udjele hidroenergije (h_j) u ukupnoj proizvodnji u elektroenergetskom sistemu (100% = maksimalna potrebna snaga termoelektrana). Primjeri vrijede za prilike prikazane na sl. 93.

nema, međutim, razlika između krivulje trajanja i dijagrama sređenih dnevnih maksimalnih opterećenja termoelektrana.

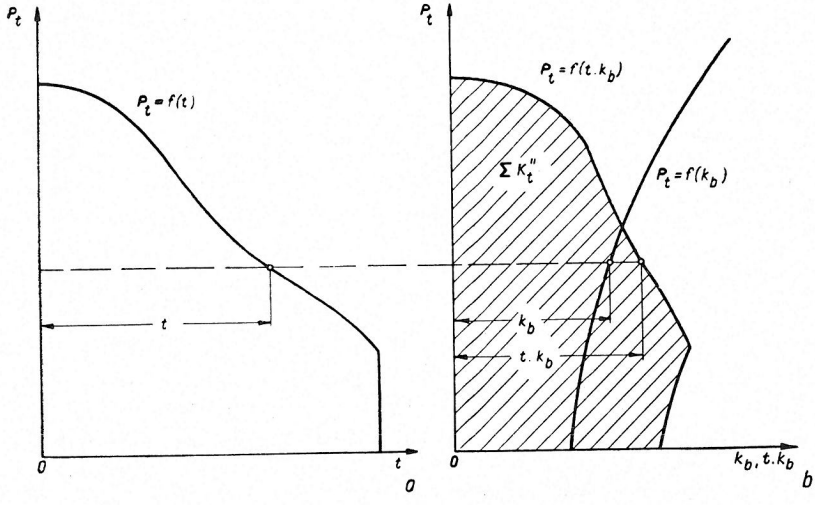
Povećanje udjela protočnih hidroelektrana ima veći utjecaj na dijagram sređenih dnevnih maksimalnih opterećenja nego na krivulju trajanja opterećenja. Povećani udio protočnih hidroelektrana dovodi ne samo do povećanja potrebne snage nego i do povećanja angažiranja snaga termoelektrana za pokrivanje varijabilnog dijela dijagrama opterećenja. Na sl. 96 prikazani su sređeni dijagrami maksimalnih dnevnih opterećenja za udio hidroenergije do 40% i 60%, za isti elektroenergetski sistem za koji vrijede dijagrami na sl. 95, ali za povećani udio protočnih hidroelektrana.



Sl. 96. Primjeri godišnjih sređenih dijagrama maksimalnih dnevnih opterećenja termoelektrana za prilike kao na sl. 95, ali uz povećani udio protočnih hidroelektrana.

c) Određivanje promjenljivih troškova u termoelektranama

Polazeći od krivulje trajanja opterećenja termoelektrana i poznavajući specifične promjenljive troškove k_b (139) u pojedinim termoelektranama sistema, možemo odrediti ukupne promjenljive troškove za elektroenergetski sistem kao cjelinu (sl. 97). U tu svrhu potrebno



Sl. 97. Određivanje promjenljivih troškova u termoelektranama iz krivulje trajanja opterećenja $P_t = f(t)$ i krivulje specifičnih promjenljivih troškova u termoelektranama $P_t = f(k_b)$.

je odrediti krivulju $P_t = f(k_b)$, gdje je P_t suma raspoloživih snaga termoelektrana, računajući od termoelektrane s najmanjim promjenljivim troškovima k_b. Da bi se dobio $P_t = f(k_b)$, termoelektrane su, dakle, poredane prema veličini promjenljivih troškova. U stvari, dobit ćemo stepeničastu krivulju, koja je na sl. 97b aproksimirana kontinuiranom krivuljom.

Množenjem apscise t (h/god) krivulje $P_t = f(t)$ i apscise k_b (Din/kWh) krivulje $P_t = f(k_b)$ za iste vrijednosti P_t dobivamo veličinu tk_b (Din/kW, god), koja predstavlja apscisu krivulje $P_t = f(tk_b)$ (sl. 97). Vrijednost tk_b predstavlja godišnje promjenljive troškove one proizvodnje koja se ostvaruje snagom od 1 kW u termoelektrani koja ima specifične promjenljive troškove k_b. Površina ispod krivulje $P_t = f(tk_b)$, koja se može prikazati izrazom

$$\int tk_b \, dP \tag{197}$$

proporcionalna je ukupnim promjenljivim troškovima u termoelektranama sistema.

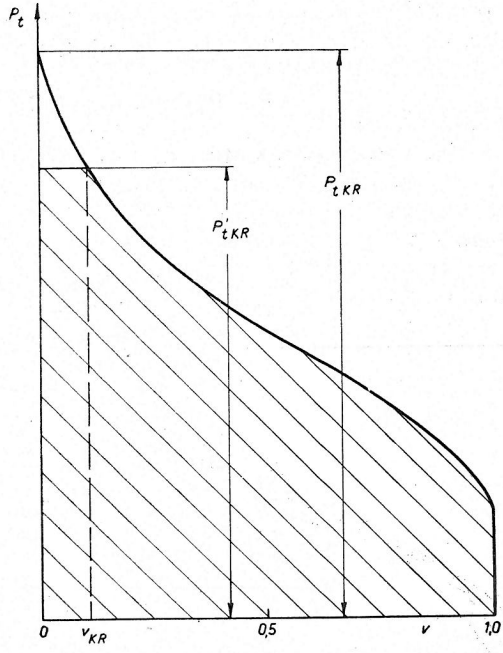
Prilikom određivanja krivulje $P_t = f(k_b)$ treba uzeti u obzir i potrebnu rezervnu snagu u termoelektranama. Bilo bi sigurno neopravdano računati da se sva potrebna rezervna snaga osigurava u termoelektranama s najvećim specifičnim promjenljivim potroškom, jer je za sve termoelektrane potrebno predvidjeti vrijeme za remont i jer u svim termoelektranama može doći do defekta. Da bi se uzele u obzir sve te mogućnosti, a uz pretpostavku da je vjerojatnost defekta i potreba remonta za sve termoelektrane međusobno jednaka, krivulju $P_t = f(k_b)$ treba odrediti uz pretpostavku snižene snage termoelektrana, kao da je ukupna rezervna snaga podijeljena na sve termoelektrane proporcionalno njihovoj maksimalnoj snazi. Treba, dakle, mjesto s maksimalnom snagom termoelektrana ($P_{t\,\max}$) računati sa snagom

$$P_t = \frac{P_{t\max}}{\varrho} \tag{198}$$

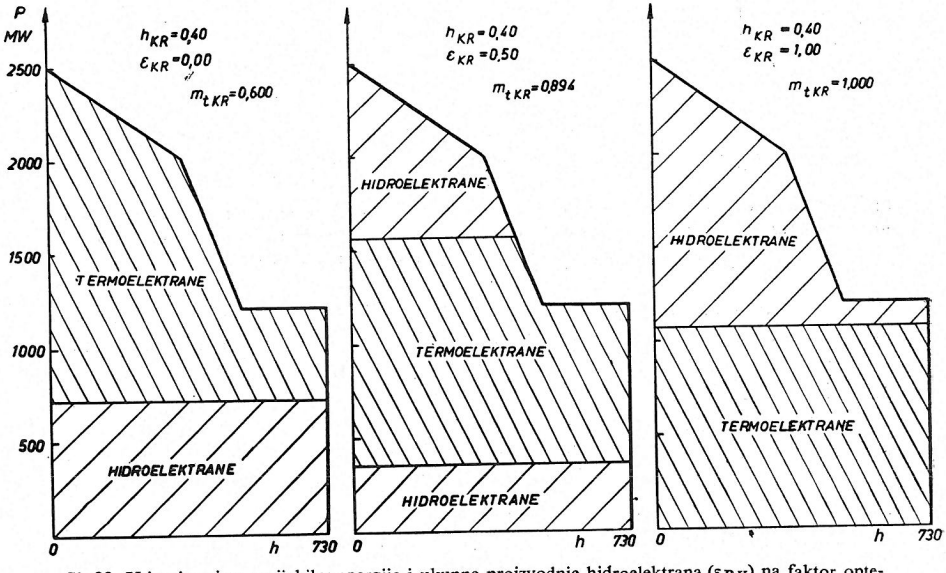
gdje je ϱ ($\varrho > 1$) faktor rezerve.

4. Prilike u kritičnom razdoblju za elektroenergetski sistem

Pod kritičnim razdobljem za elektroenergetski sistem razumijevamo ono vremensko razdoblje u godini kad je za zadovoljenje potrošača potrebno angažirati najveću snagu iz termoelektrana. U elektroenergetskom sistemu, u kojemu postoje samo termoelektrane, kritično razdoblje nastupa u danu najvećeg maksimalnog opterećenja, dok u elektroenergetskom sistemu sa znatnim postotkom hidroenergije kritično razdoblje najčešće nastupa u periodu najmanjih protoka. Međutim,



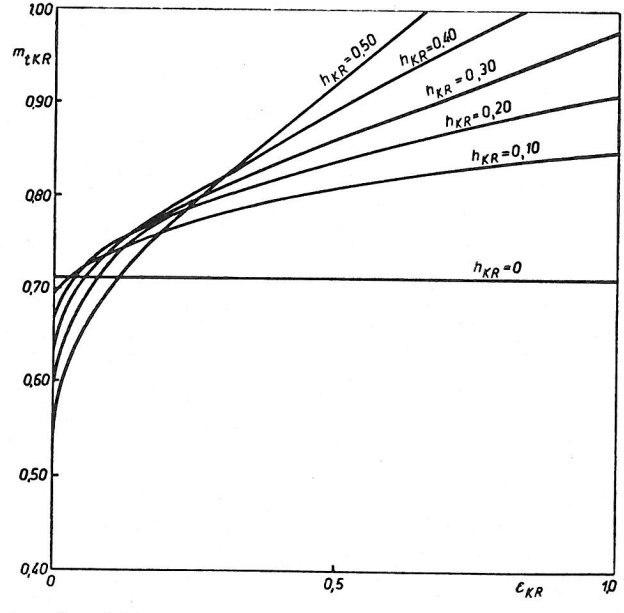
Sl. 98. Definicija potrebne raspoložive snage termoelektrana u kritičnom razdoblju. P_{tKR} potrebna snaga za potpuno zadovoljenje potreba potrošača, P'_{tKR} potrebna snaga uz smanjenje dobave nekim grupama potrošača.



Sl. 99. Utjecaj omjera varijabilne energije i ukupne proizvodnje hidroelektrana (ε_{RK}) na faktor opterećenja termoelektrana (m_{tKR}) u kritičnom razdoblju.

to se ne mora pojaviti baš u razdoblju najmanjih protoka, jer pojava kritičnog razdoblja ovisi o rasporedu protoka tokom godine i o sezonskoj varijaciji potrošnje električne energije.

U krivulji trajanja opterećenja termoelektrana potrebna raspoloživa snaga termoelektrana za $v = 0$ predstavlja, dakle, potrebno opterećenje termoelektrana P_{tKR} u kritičnom razdoblju (sl. 97). Međutim, kao što ćemo vidjeti u poglavlju VI, neće uvijek biti opravdano da se u svim slučajevima zadovolje sve potrebe potrošača, pa će zbog toga biti potrebno manje maksimalno opterećenje termoelektrana (na primjer, P'_{tKR} na sl. 98). U tom slučaju kao kritično razdoblje možemo smatrati ono koje se pojavljuje uz $v = v_{KR}$, odnosno onaj



Sl. 100. Primjer ovisnosti faktora opterećenja termoelektrana (m_{tKR}) o omjeru varijabilne energije i ukupne moguće proizvodnje hidroelektrana (ε_{KR}) te o omjeru ukupne moguće proizvodnje hidroelektrana i potrebne energije (h_{KR}) u kritičnom razdoblju.

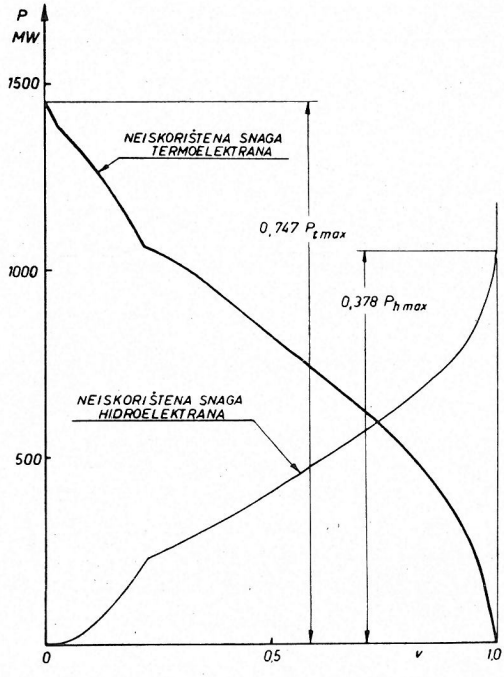
period kad se sa snagom P'_{tKR} mogu zadovoljiti sve potrebe potrošača. U razdobljima za $v < v_{KR}$ maksimalno opterećenje termoelektrana također je jednako P'_{tKR}, jer veća snaga termoelektrana ne stoji na raspolaganju.

Od interesa je poznavati faktor opterećenja termoelektrana u kritičnom razdoblju, jer on daje odnos između potrebne proizvodnje i opterećenja termoelektrana. Faktor opterećenja termoelektrana u kritičnom razdoblju m_{tKR} ovisi o obliku dijagrama opterećenja, o omjeru h_{KR} hidroenergije i ukupnih potreba u kritičnom razdoblju, kao i o omjeru ε_{KR} varijabilne energije i ukupne proizvodnje hidroelektrana u kritičnom razdoblju. Primjera radi pođimo od mjesečne

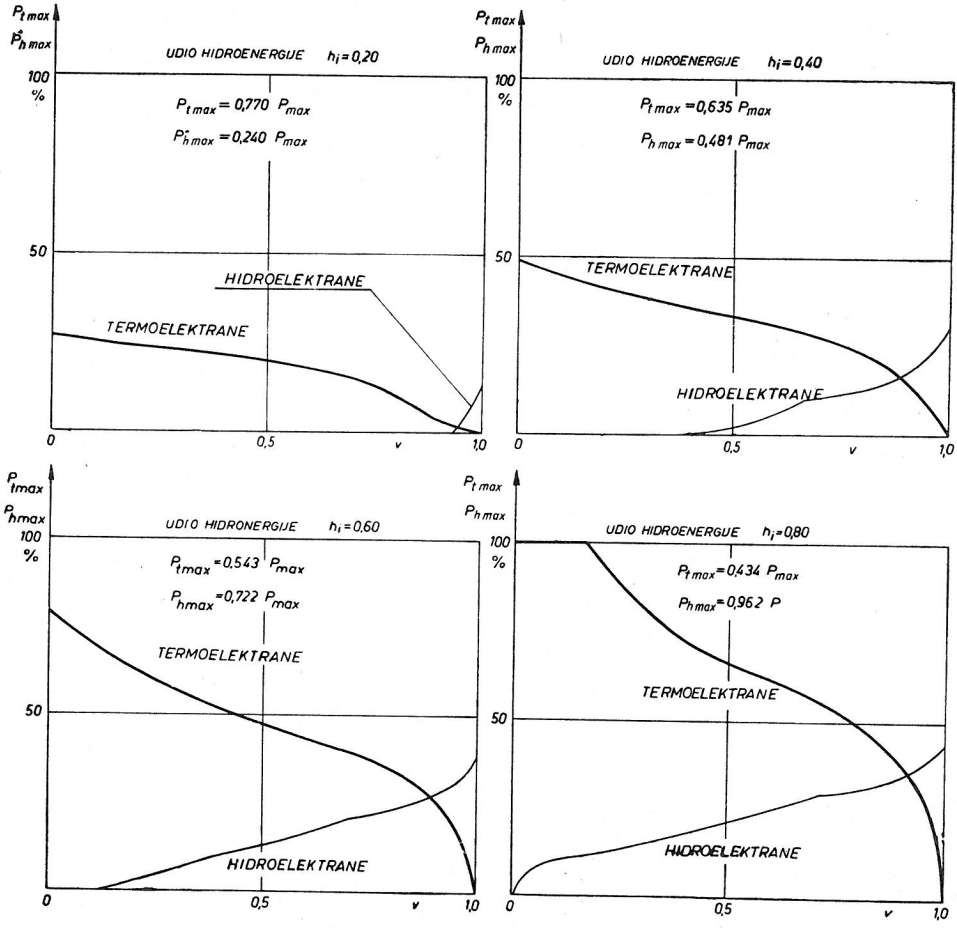
krivulje trajanja opterećenja u kritičnom razdoblju prikazane na sl. 99 i odredimo faktor opterećenja termoelektrana u ovisnosti o omjeru h_{KR} i omjeru ε_{KR}. Na sl. 99 prikazana su tri slučaja u kojima uvijek imamo isti oblik dijagrama opterećenja, postotak hidroenergije h_{KR}, ali različiti postotak varijabilne energije ε_{KR}. U sva tri slučaja imamo, dakle, istu potrebnu količinu termoenergije, ali za njenu proizvodnju u prvom slučaju moramo angažirati znatno veću snagu ($m_{tKR} = 0{,}60$) nego u trećem slučaju ($m_{tKR} = 1{,}00$), kad se sva energija iz hidroelektrana može proizvesti kao varijabilna energija ($\varepsilon_{KR} = 1{,}00$). Na sl. 100, za istu krivulju trajanja opterećenja, prikazana je ovisnost faktora opterećenja termoelektrana m_{tKR} o omjeru ε_{KR} za konstantne udjele hidroenergije h_{KR}. Vidljiva je korist od povećanja omjera ε_{KR}, jer se s povećanjem mogućnosti proizvodnje varijabilne energije smanjuje faktor opterećenja termoelektrana, što u krajnjoj liniji dovodi do smanjenja potrebe izgradnje termoelektrana. Povoljni utjecaj povećanja omjera ε_{KR} je tim veći što je veći omjer h_{KR}.

5. Rezerva snage u elektroenergetskom sistemu

Na osnovu dijagrama na sl. 89 i 90 možemo odrediti neiskorištenu snagu hidroelektrana i termoelektrana (sl. 101). Pod neiskorištenom



Sl. 101. Neiskorištena snaga hidroelektrana i termoelektrana za prilike prikazane na sl. 89.



Sl. 102. Neiskorištena snaga hidroelektrana i termoelektrana za različite udjele hidroenergije u ukupnoj proizvodnji u sistemu. Primjeri vrijede za prilike prikazane na sl. 93 i 95.

snagom razumijevamo onu snagu koja ostaje neiskorištena u momentu maksimalnog opterećenja u radnom danu. Naravno da podaci u dijagramu vrijede samo za slučaj na sl. 89. U doba velikih voda koristi se, naime, sva ili skoro sva snaga hidroelektrana u momentu maksimalnog opterećenja, pa tada ne postoji rezerva snage u hidroelektranama. U to doba, međutim, postoji vrlo velika neiskorištena snaga u termoelektranama, pa defekt na nekom od agregata u hidroelektranama ili defekt u nekoj od hidroelektrana ne može dovesti u pitanje opskrbu potrošača. Nasuprot tome, u doba vrlo malih voda postoji znatna neiskorištena snaga u hidroelektranama, ali se ona ne može iskoristiti

u slučaju defekta u termoelektranama, jer se raspoloživa voda u hidroelektranama već koristi da bi se ostvarilo najveće moguće iskorištenje snage hidroelektrana.

Prema tome, potrebno je predvidjeti rezervnu snagu u termoelektranama, koja treba da zamijeni agregate u termoelektranama ili termoelektrane u kojima dođe do defekta. U hidroelektranama, međutim, nije potrebna rezervna snaga, jer se u doba velikih voda defekt u hidroelektrani može nadoknaditi snagom termoelektrane, a defekt u hidroelektrani u doba malih voda nadoknađuje se neiskorištenom snagom iz hidroelektrana.

Na sl. 102, opet primjera radi, prikazana je neiskorištena snaga u hidroelektranama i termoelektranama za elektroenergetski sistem za koji vrijede dijagrami na sl. 93 i 95. Preračunato na maksimalnu raspoloživu snagu može se konstatirati da se najveća neiskorištena snaga pojavljuje pri velikom udjelu hidroenergije u ukupnoj proizvodnji elektroenergetskog sistema. U svim slučajevima prikazanim na sl. 102 vrijedi sve ono što je već kazano u pogledu potrebne rezerve u hidroelektranama i termoelektranama. Uspoređujući, međutim, krivulje na sl. 102 opazit ćemo da je pojava relativno velikih neiskorištenih snaga u termoelektranama i hidroelektranama znatno češća u slučajevima kad se radi o elektroenergetskim sistemima s velikim udjelom hidroenergije.

Treba napomenuti, da je u svim slučajevima kad se govori o neiskorištenoj snazi termoelektrana već odbijena potrebna rezervna snaga od maksimalne snage termoelektrana, pa u slučaju kad nema neiskorištene snage još postoji rezervna snaga za slučaj defekta.

ŠESTO POGLAVLJE

SIGURNOST OPSKRBE POTROŠAČA

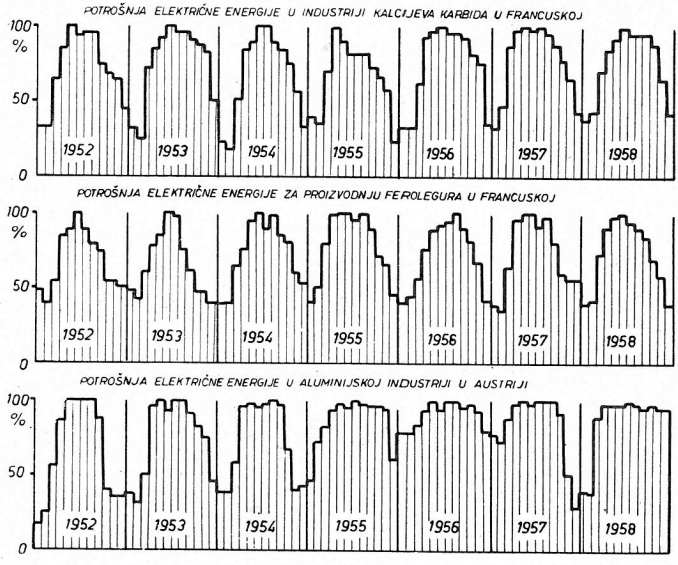
1. Mane i prednosti ograničenja potrošnje električne energije

Izgradnjom dovoljnog broja elektrana s dovoljnom snagom — ako se radi o sistemu samih termoelektrana — odnosno s dovoljnom snagom i s dovoljnom mogućnošću proizvodnje—ako se radi o sistemu hidroelektrana i termoelektrana — može se s potpunom sigurnošću opskrbiti svaku potrošnju. Postavlja se međutim pitanje, da li treba težiti da se ostvari takva izgradnja elektrana da bude osigurana potpuna opskrba potrošača u svakoj situaciji koja se može pojaviti odnosno koja se može predvidjeti. U sistemima, u kojima postoje potrošači kao što su npr. lučne peći za proizvodnju karbida i ferolegura, elektrolize aluminija i sl., normalno je prihvaćeno stanovište da nije potrebno takvim potrošačima osigurati potpunu dobavu u svakom razdoblju godine. Na sl. 103 prikazane su primjera radi mjesečne potrošnje u nekim grupama industrije, koje rade u pojedinim razdobljima godine sa smanjenom potrošnjom. Najveća ostvarena mjesečna potrošnja u pojedinoj godini uzeta je kao 100%. Dobava takvim potrošačima regulira se ugovorima, kojima su npr. u pojedinim mjesecima ograničava maksimalna snaga, predviđaju viši tarifni stavovi i sl.

Takvo stanje sigurno nije korisno za potrošače, jer se tada bilo djelomično bilo potpuno obustavlja proizvodnja, za koju inače postoje svi ostali uvjeti. Nastaje gubitak u industriji, koji je jednak razlici između vrijednosti one količine proizvoda, koja bi mogla biti proizvedena, i troškova za materijal, plaće (samo dio ovisan o proizvodnji), energiju i sl. koji bi bili potrebni za istu količinu proizvoda.

Nasuprot tome, takvo stanje ima pozitivnih posljedica za elektroenergetski sistem. Uz smanjenje opterećenja kod potrošača u elektroenergetskom sistemu potrebno je izgraditi manje elektrana odnosno manju snagu u elektranama i proizvesti manje energije. Do smanjenja potrošnje dolazi u kritičnom razdoblju odnosno u situacijama koje se mnogo ne razlikuju od kritičnog razdoblja. Dopuna u kritičnom razdoblju normalno je ekonomičnija termoelektranama nego hidroelektranama, jer tada stoji na raspolaganju cijela snaga termoelektrane za pokrivanje potreba, dok se to ne može reći za hidroelek-

tranu, koja — kako je pokazano u poglavlju V — može koristiti samo dio svoje snage, što ovisi o njenoj proizvodnji i o proizvodnji ostalih hidroelektrana u tom razdoblju. Prema tome smanjenje opterećenja



Sl. 103. Oscilacije mjesečne potrošnje u nekim grupama potrošača. Najveća ostvarena mjesečna potrošnja u pojedinoj godini uzeta je kao 100%.

potrošača dovodi do smanjenja izgradnje termoelektrana i do smanjenja proizvodnje u termoelektranama, pa korist koja nastaje u elektroenergetskom sistemu sastoji se od zbroja koristi zbog manje izgradnje termoelektrana i manje proizvodnje u termoelektranama. Manja proizvodnja međutim ne znači uvijek — kako će se kasnije vidjeti — i smanjenje troškova u termoelektranama, jer se redukcijom potrošnje smanjuje i potreba izgradnje novih termoelektrana, koje imaju manje specifične promjenljive troškove.

Razlika između koristi u elektroprivredi i štete u industriji predstavlja korist (ako je korist veća od štete) odnosno štetu (ako je šteta veća) u narodnoj privredi. Optimum za narodnu privredu bit će postignut kad korist postane maksimalna.

2. Uvjet za postizanje optimalnog opsega redukcija

Prilikom određivanja optimalnog opsega redukcija pođimo od prilika, koje ćemo susresti u praksi. Za konzum u nekoj od slijedećih godina stajat će na raspolaganju određene hidroelektrane, koje se već

grade ili za koje je već odlučeno da će biti do tog razdoblja izgrađene, te termoelektrane koje već postoje ili koje se već grade. Te termoelektrane normalno nisu dovoljne za potpuno zadovoljenje potreba, pa bi bilo potrebno izgraditi nove termoelektrane, da bi se smanjile odnosno eliminirale redukcije potrošnje. Postavlja se pitanje koliko treba izgraditi novih termoelektrana ili koji opseg redukcije potrošnje treba predvidjeti da bi se postigao optimum za narodnu privredu.

Izgradnjom novih termoelektrana postiže se u industriji korist za narodnu privredu radi povećanja proizvodnje odnosno smanjenjem redukcije smanjuje se šteta kod potrošača. Godišnja korist može se prikazati izrazom

$$K_a = \sum_{n=1}^{n} (c_n - k_{mn})\, a_{sn}\, W_{rn} \tag{199}$$

gdje je c vrijednost proizvoda industrije, kojoj je smanjena ili obustavljena dobava električne energije, npr. u Din/kg, k_m troškovi ovisni o proizvodnji (materijal, plaće, energija i sl.) u industriji također po jedinici proizvoda (opet npr. Din/kg), a_s specifična proizvodnja proizvoda industrije po jedinici utrošene energije (u našem primjeru kg/kWh), dok je W_r dodatno isporučena količina energije u godini (kWh/god) radi koje je došlo do koristi u industriji. Znak sume postavljen je zbog toga jer se povećanje dobave vrši za različite grupe potrošača.

Osim koristi koja je posljedica razlike između vrijednosti proizvoda i troškova, koji su ranije spomenuti, mogu u nekim slučajevima nastati i dodatne koristi kao posljedica smanjenja redukcije potrošnje. Takva dodatna korist pojavljuje se zbog smanjenja potrebe uskladištenja, koje je potrebno zbog kontinuiteta isporuke proizvoda, zbog smanjenja radnih operacija i sl. Može se računati, da je ta dodatna korist proporcionalna s količinom proizvoda, koja se može proizvesti dodatno dobavljenom električnom energijom. Faktor proporcionalnosti označimo s k_z (Din/kg), pa je za n-tog potrošača ta korist $k_{zn}\, a_{sn}\, W_{rn}$.

Izgradnjom novih termoelektrana smanjuje se maksimalno reducirana snaga kod potrošača, pa ta činjenica u nekim slučajevima dovodi do daljnje koristi. Takav slučaj može nastupiti kod potrošača, koji imaju lučne peći kod kojih npr. obloga može trajati dvije godine, a obustavljanje peći svake godine izaziva svakogodišnju obnovu obloge. Prema tome kad ne postoje redukcije, pa dakle ni praktički svakogodišnja obustava peći, troškovi obnove obloge iznosit će polovinu od troškova potrebnih za obnovu obloge u usporedbi s troškovima kad je svakogodišnja obustava uvjetovana redukcijom potrošnje. Može se uzeti da je ta dodatna korist proporcionalna s maksimalnom reduciranom snagom, pa je možemo označiti s $k_{pn} P_{pn}$ za n-tog potrošača, gdje je k_{pn} dodatna korist u Din/kW, god, a P_{rn} smanjenje reducirane snage.

Uzevši u obzir obje gore spomenute dodatne koristi, izraz (199) možemo pisati

$$K_a = \sum_{n=1}^{n} (c_n - k_{mn} + k_{zn})\, a_{sn}\, W_{rn} + k_{pn}\, P_{rn} \tag{200}$$

Pri tome treba imati na umu činjenicu da može biti $k_z = 0$ i $k_p = 0$. Da pojednostavimo označavanje postavimo, da je

$$k_{wn} = (c_n - k_{mn} + k_{zn})\, a_{sn} \tag{201}$$

pa (200) imamo sada u obliku

$$K_a = \sum_{n=1}^{n} (k_{wn}\, W_{pn} + k_{pn}\, P_{rn}) \tag{202}$$

gdje k_{wn} predstavlja korist zbog smanjenja redukcije za jedan kWh, a k_{pn} godišnju korist za smanjenje redukcije za jedan kW.

Za smanjenje redukcije potrebno je međutim povećati troškove u elektroenergetskom sistemu. To povećanje troškova možemo prikazati izrazom

$$K_s = (1 + \Delta p)\, \varrho\, b_t\, P_r + (1 + \Delta w)\, k_r\, W_r \tag{203}$$

gdje je Δp relativni gubitak snage između elektrana i potrošača, ϱ faktor rezerve u termoelektranama, b_t specifični stalni godišnji troškovi po jedinici snage na pragu elektrana u Din/kW god P_r smanjenje reducirane snage kod potrošača, Δw relativni gubitak energije između elektrana i potrošača, k_r specifični promjenljivi troškovi u termoelektranama u Din/kWh, a W_r smanjenje reducirane energije računato kod potrošača. Pri tome treba imati na umu da je $P_r = \Sigma P_{rn}$ i $W_r = \Sigma W_{rn}$.

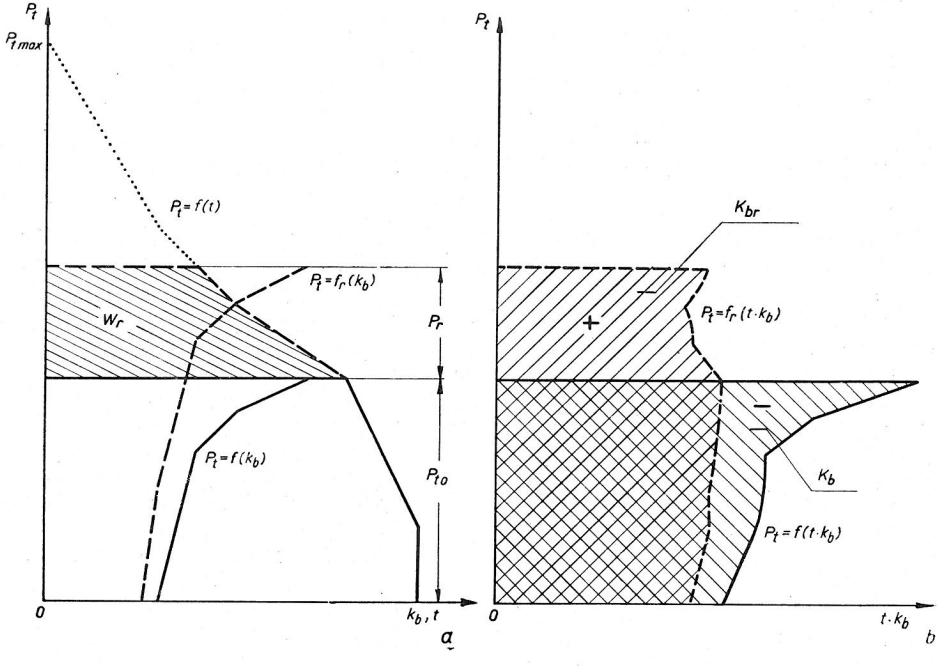
Veličine Δp i Δw možemo smatrati konstantnima, iako to u stvari nisu, jer se radi o relativno malim veličinama i redukciji velikih potrošača koji se normalno nalaze u blizini elektrana ili velikih transformatorskih stanica. Treba međutim napomenuti da Δp i Δw mogu postati i negativne veličine pogotovo ako se potrošač kojemu se smanjuje redukcija nalazi u neposrednoj blizini elektrane pa se povećanjem dobave tom potrošaču smanjuje mogućnost dobave ostalim udaljenim potrošačima. U tom slučaju mogu dakle ukupni gubici i pored povećane dobave postati manji.

Specifični promjenljivi troškovi u termoelektranama preračunati na povećanu proizvodnju u termoelektranama mogu se prikazati slijedećim izrazom

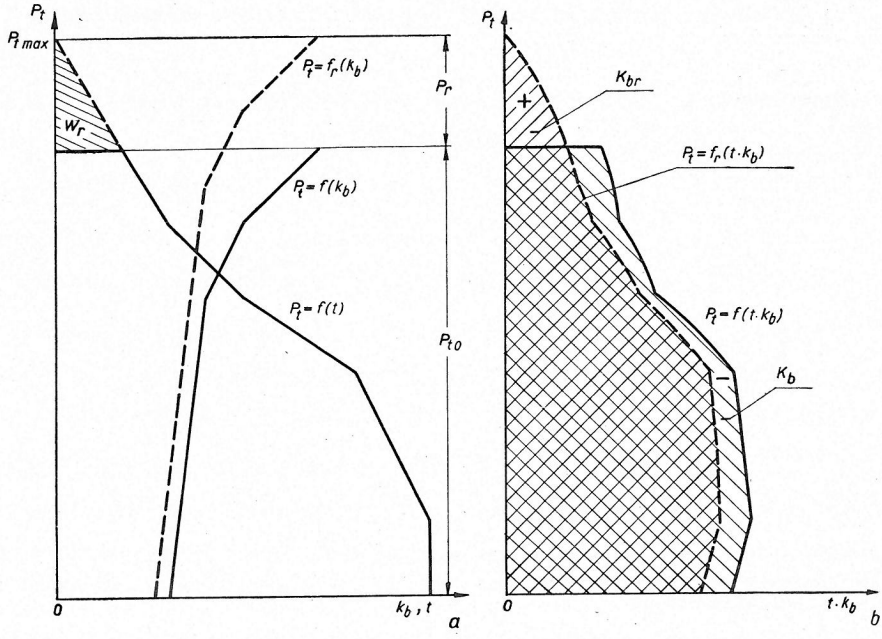
$$k_r = \frac{K_{br} - K_b}{W_r} \tag{204}$$

gdje su K_b ukupni promjenljivi troškovi u termoelektranama sistema prije izgradnje novih termoelektrana dakle i prije smanjenja redukcije, dok su K_{br} ukupni promjenljivi troškovi u termoelektranama nakon smanjenja redukcije za količinu energije W_r i nakon izgradnje novih termoelektrana.

Da se prikaže međusobni odnos veličina K_{br} i K_b, određeni su ukupni promjenljivi troškovi u termoelektranama bez smanjenja redukcija i sa smanjenjem redukcija na način opisan u poglavlju (V 3 c). Na sl. 104 i 105 prikazan je dijagram opterećenja termoelektrana (potrebna snaga $P_{t\,\max}$) kad bi htjeli potpuno eliminirati redukcije te mogući dijagram opterećenja termoelektrana (raspoloživa snaga P_{to}) prije izgradnje novih termoelektrana. U prvom slučaju raspoloživa snaga termoelektrana iznosi $P_{to} = 0{,}4\,P_{t\,\max}$ a u drugom $P_{to} = 0{,}8\,P_{t\,\max}$. U oba slučaja 2/3 od raspoložive snage termoelektrana ima



Sl. 104. Potrebni promjenljivi troškovi u termoelektranama prije (K_b) i nakon (K_{br}) eliminiranja redukcije potrošnje električne energije za mali P_{to}.



Sl. 105. Potrebni promjenljivi troškovi u termoelektranama prije (K_b) i nakon (K_{br}) eliminiranja redukcije potrošnje električne energije za veliki P_{to}.

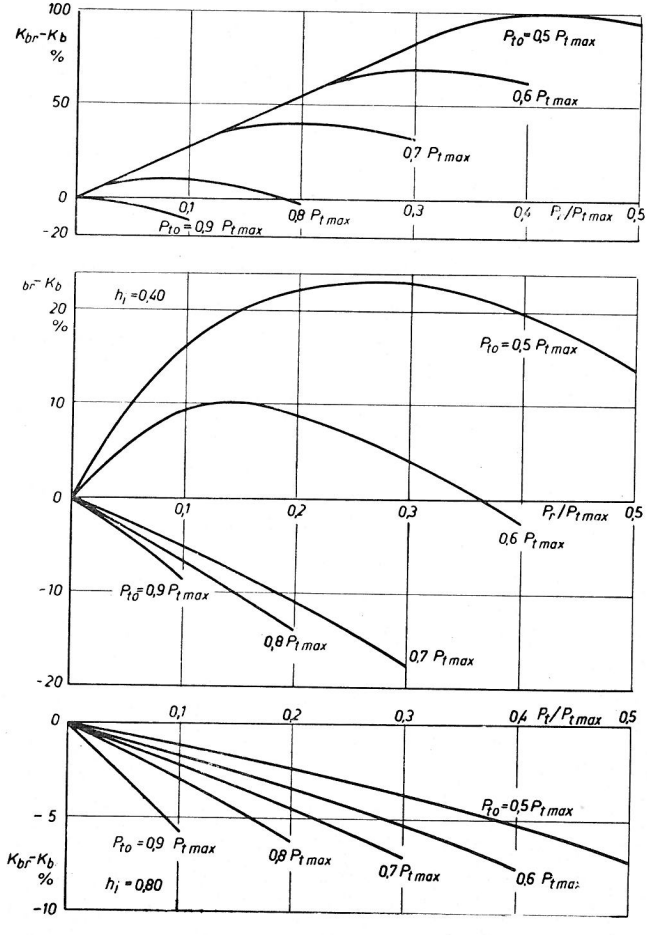
manje specifične promjenljive troškove, dok je preostala trećina termoelektrana manje ekonomična. Ovisnost specifičnih promjenljivih troškova k_b o angažiranoj snazi prikazana je krivuljama $P_t = f(k_b)$. U oba slučaja pretpostavljeno je da se redukcije žele eliminirati snagom $P_r = 0{,}2\,P_{\max}$, te da se radi toga za toliko povećava raspoloživa snaga termoelektrana u oba slučaja s istim specifičnim promjenljivim troškovima. Množenjem veličina t i k_b za istu snagu dobivamo krivulje $P = f(tk_b)$ za slučaj kad nema smanjivanja redukcije i krivulje $P = f_r(tk_b)$ za prilike kad je izgradnjom termoelektrana smanjena redukcija. Površine ispod tih krivulja predstavljaju ukupne promjenljive troškove u termoelektranama sistema.

U prvom je slučaju (sl. 104) $K_{br} > K_b$, jer povećanje proizvodnje za W_r traži veće promjenljive troškove (površina označena s +) nego što je smanjenje troškova za osnovnu proizvodnju do kojeg dolazi zbog izgradnje novih ekonomičnijih termoelektrana (površina označena s —). U drugom slučaju (sl. 105) situacija je obrnuta, jer je tada $K_{br} < K_b$. Prema tome je u prvom slučaju $k_r > 0$ (204), a u drugom $k_r < 0$.

Predznak veličine k_r ovisi dakle za zadani dijagram opterećenja odnosno za zadanu krivulju trajanja opterećenja i za zadanu strukturu termoelektrana odnosno za zadani tok krivulje $P_t = f(k_b)$ o snazi

P_{to} i snazi P_r. Osim toga veličina k_r ovisi o obliku krivulje trajanja opterećenja.

Da se prikažu navedeni utjecaji određene su razlike $K_{br} - K_b$ (sl. 106) za elektroenergetski sistem, za koji su primjeri krivulja trajanja



Sl. 106. Razlika između potrebnih promenljivih troškova u termoelektranama nakon (K_{br}) i prije (K_b) eliminiranja redukcije za različite polazne raspoložive snage termoelektrana P_{to} i različite udjele hidroenergije h_j u ukupnoj proizvodnji u elektroenergetskom sistemu

opterećenja prikazani u poglavlju (V 3) i to za slučaj da u sistemu postoje samo termoelektrane ($h_j = 0$), te za slučajeve da udio hidroelektrana u ukupnoj proizvodnji iznosi 40 i 80% ($h_j = 0,40$ i $h_j = 0,80$). Prilikom određivanja svih veličina pretpostavljeno je, da se redukcija

dobave električne energije vrši kod potrošača koji troše energiju uz konstantno opterećenje. Razlika $K_{br} - K_b$ prikazana je u procentima s tim da je kao 100% uzeta maksimalna razlika troškova, koja se pojavljuje za $h_j = 0$ i $P_{to} = 0{,}5\ P_{t\,\max}$. Prema podacima na sl. 106 vidi se, da je za isti oblik krivulje trajanja (isti h_j) razlika $K_{br} - K_b$ to manja, te da postaje i negativna, što je veća snaga P_{to}, koja je polazna snaga razmatranja. Razlike između prilika za različite udjele hidroenergije posljedica su oblika krivulje trajanja opterećenja (sl. 93).

Još veći utjecaj udjela hidroenergije h_j (sl. 107) imamo na veličinu k_r (204) odnosno na njezinu relativnu vrijednost $\varkappa_r$, koja je omjer između veličine k_r i specifičnih promenljivih troškova u najekonomičnijoj termoelektrani. To je sada posljedica strmine krivulje trajanja opterećenja, jer se za vrlo strmu krivulju opterećenja i sa znatnim povećanjem snage termoelektrana ne smanjuje u znatnoj mjeri reducirana količina energije W_r.

Krivulje na sl. 106 i 107 naravno vrijede samo za promatrani elektroenergetski sistem i uz navedene pretpostavke, pa se ne mogu primijeniti za druge elektroenergetske sisteme, iako prikazuju utjecaj pojedinih faktora na promatrane veličine.

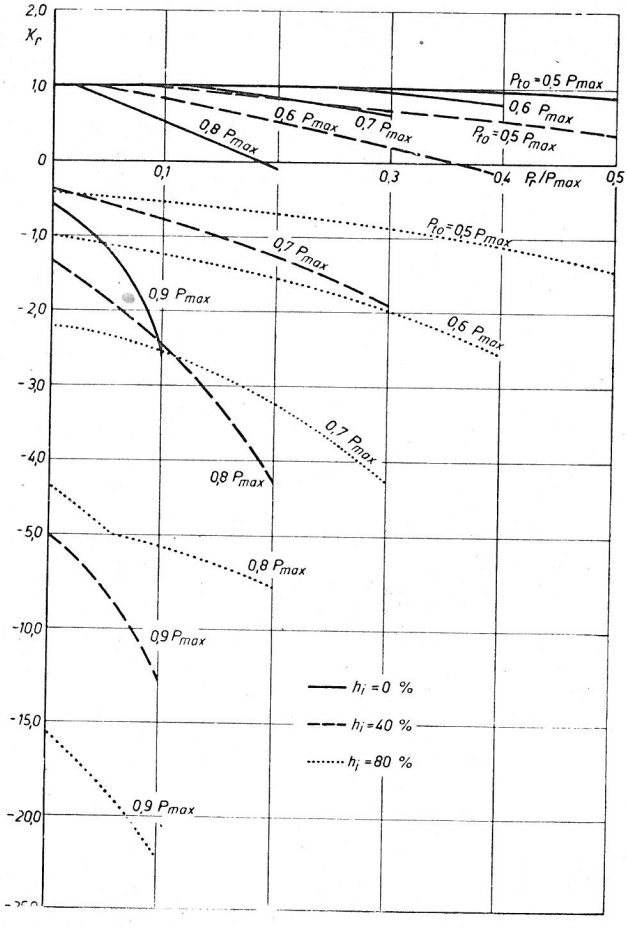
Poznavajući dakle sve te veličine možemo prijeći na određivanje optimalnog opsega redukcije odnosno optimalnog opsega smanjenja redukcije. Razlika između K_a (202) i K_s (203) predstavlja korist za narodnu privredu K_n radi smanjenja redukcija, a optimum za narodnu privredu bit će postignut kad veličina K_n bude maksimalna. Kako smo pretpostavili, sve su veličine u (202) i (203) konstantne osim W_{rn}, P_{rn}, W_r, P_r i k_r. Sve navedene veličine su funkcije snage P_r, za koju se smanjuje redukcija dobave električne energije, pa je i korist za narodnu privredu

$$K_n = f(P_r) \tag{205}$$

Prema tome iz uvjeta za ekstrem dobivamo, da je

$$\begin{aligned}(1+\Delta p)\,\varrho\, b_t = \sum_{n=1}^{n} k_{wn}\frac{dW_{rn}}{dP_r} + \sum_{n=1}^{n} k_{pn}\frac{dP_{rn}}{dP_r} - \\ -(1+\Delta w)\left(k_r\frac{dW_r}{dP_r} + W_r\frac{dk_r}{dP_r}\right)\end{aligned} \tag{206}$$

Pri tome treba uzeti u obzir, da drugi član na desnoj strani ima samo za jednog od potrošača konačnu vrijednost i to upravo za onoga kod kojega promjena snage P_r izaziva promjenu maksimalne reducirane snage. Za sve ostale potrošače diferencijalni kvocijent je nula. Prema



Sl. 107. Relativni specifični promjenljivi troškovi u termoelektranama radi povećanja proizvodnje u termoelektranama za različite polazne raspoložive snage termoelektrana P_{to} i različite udjele hidroenergije h_j u ukupnoj proizvodnji u elektroenergetskom sistemu.

tome drugi član ima vrijednost k_{ps}, gdje se indeks s odnosi na spomenutog potrošača. Osim toga mjesto W_r možemo pisati ΣW_{rn}, pa izraz (206) konačno glasi

$$(1+\Delta p)\,\varrho\, b_t = \sum_{n=1}^{n} [k_{wn} - (1+\Delta w)\, k_r] \frac{dW_{rn}}{dP_r} + \\ + k_{ps} - (1+\Delta w)\, W_r \frac{dk_r}{dP_r} \tag{207}$$

Da se izbjegnu novčani pokazatelji uvedimo još relativne novčane vrijednosti i to tako da sve novčane pokazatelje prikažemo u odnosu na specifične promjenljive troškove najekonomičnije termoelektrane u sistemu ($k_{b\,\min}$). U tu svrhu podijelimo lijevu i desnu stranu jednadžbe (207) s veličinom $k_{b\,\min}$, te uvedimo slijedeće relativne veličine $\varkappa_{wn} = k_{wn}/k_{b\,\min}$, $\varkappa_r = k_r/k_{b\,\min}$, $\varkappa_{ps} = k_{ps}/k_{b\,\min}$, $\beta_t = b_t/k_{b\,\min}$. Jednadžba (207) sada glasi

$$(1+\Delta p)\,\varrho\,\beta_t = \sum_{n=1}^{n} [\varkappa_{wn} - (1+\Delta w)\varkappa_r] \frac{dW_{rn}}{dP_r} + \\ + \varkappa_{ps} - (1+\Delta w)\, W_r \frac{d\varkappa_r}{dP_r} \tag{208}$$

Utvrdimo još da li je ekstrem za koji vrijedi uvjet (208) i maksimum funkcije (205). Druga derivacija spomenute funkcije ima vrijednost — upotrebivši oznake iz (208) —

$$\frac{d^2K_n}{dP^2_r} = \sum_{n=1}^{n} [\varkappa_{wn} - (1+\Delta w)\,\varkappa_r] \frac{d^2W_{rn}}{dP^2_r} - \\ - 2\,(1+\Delta w) \frac{dW_r}{dP_r}\,\frac{dK_r}{dP_r} - (1+\Delta w)\, W_r \frac{d^2\varkappa_r}{dP_r^2} \tag{209}$$

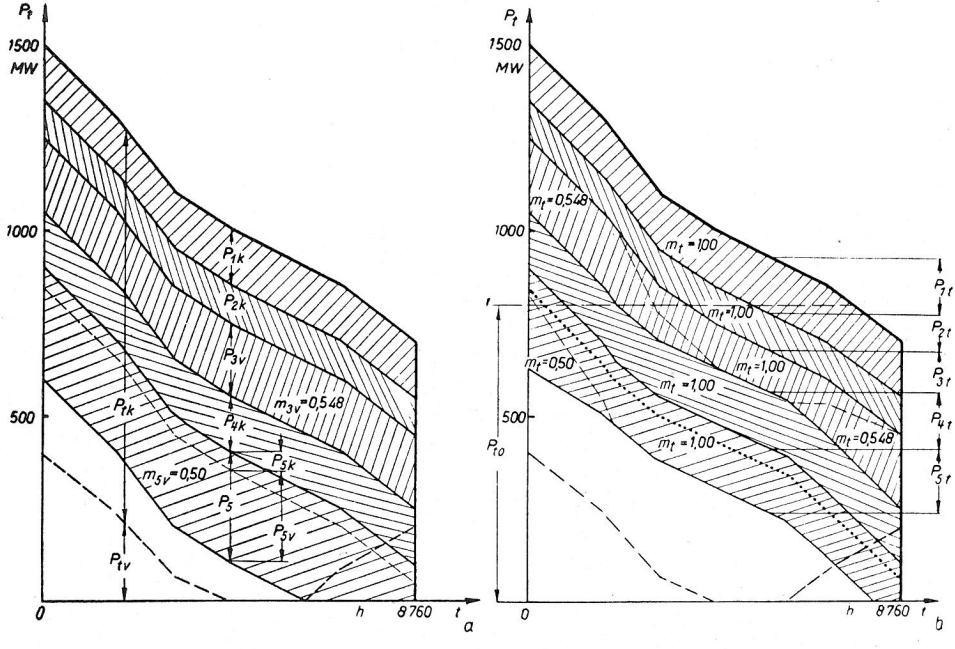
pa izraz (209), ako se radi o maksimumu, mora biti negativan. Suma na desnoj strani jednadžbe uvijek je negativna, jer je d^2W_{rn}/dP^2_r uvijek negativna veličina budući da je $dW_r/dP_r = f(P_r)$ opadajuća funkcija, dok je $\varkappa_r$ normalno maleno prema $\varkappa_{wn}$. Ako je međutim za potrošača s najmanjim $\varkappa_{w1}$ i za polazno stanje razmatranja s malim P_{to}, kad je $\varkappa_r > 0$ i $\varkappa_{w1} < \varkappa_r$, utjecaj će ostalih potrošača biti toliki — jer će tada biti reducirani i drugi potrošači radi malog P_{to} — da će suma biti ipak negativna. U slučajevima s kojima se međutim susrećemo u praksi bit će $\varkappa_r < 0$, pa će izraz u uglatoj zagradi biti uvijek pozitivan. Drugi član — kad uzmemo u obzir i njegov predznak — bit će uvijek pozitivan, jer je $d\varkappa_r/dP_r < 0$, a $dW_r/dP_r > 0$. Treći je član — uzevši u obzir i njegov predznak — uvijek pozitivan, što slijedi iz oblika krivulja na sl. 107. Drugi i treći član su međutim — kako pokazuju praktički računi — mnogo manji od sume, koja predstavlja prvi član. Dakle, ispunjen je uvjet da je druga derivacija funkcije $K_n = f(P_r)$ uvijek negativna veličina, pa je izraz (208) i maksimum spomenute funkcije.

3. Određivanje optimalnog opsega redukcije

Da bi se odredio optimalni opseg redukcije, treba najprije odrediti redoslijed potrošača prema kojemu se oni obustavljaju ako nema na raspolaganju potrebne snage i energije. Ako se u nekom sistemu pojavi pomanjkanje snage i energije, najprije će se reducirati onaj potrošač, kod kojega nastaje najmanja šteta, tj. onaj potrošač, koji ima najmanji $\varkappa_w$. Za njim će slijediti potrošači s većim $\varkappa_w$. Označimo dakle s indeksom 1 potrošača s najmanjim $\varkappa_w$, s indeksom 2 slijedećeg s većim $\varkappa_w$ itd. Pa je prema tome $\varkappa_{w1} < \varkappa_{w2} < \ldots < \varkappa_{wn}$.

Kao osnova za analizu služi sređeni dijagram dnevnih maksimalnih opterećenja termoelektrana (poglavlje V 3b), u kojem se može prikazati potrebna snaga termoelektrana u varijabilnom i konstantnom dijelu dijagrama opterećenja. Radi bolje preglednosti ucrtajmo u gornji dio dijagrama snage termoelektrana, koje se koriste u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja, a u donjem dijelu snage koje se koriste u varijabilnom dijelu (sl. 108).

Na takvom dijagramu možemo sada unijeti potrebne snage za pojedine grupe potrošača i to postavljajući u najgornji dio dijagrama potrošača s indeksom 1 (s najmanjim $\varkappa_w$) pa redom prema veličini $\varkappa_w$.



Sl. 108. Snaga potrebna grupama potrošača u času maksimalnog opterećenja sistema (*a*) i potrebna snaga termoelektrana za opskrbu grupa potrošača (*b*). Prikaz u sređenom dijagramu dnevnih maksimalnih opterećenja (Numerički primjer).

Unošenje u dijagram treba izvršiti sa snagom koju potrošač uzima računajući na pragu elektrana u momentu maksimalnog opterećenja sistema (snage P_1, P_2 ... na sl. 108).

Budući da se tu radi o velikim industrijskim potrošačima koji imaju male sezonske oscilacije i potrošnje i maksimalnog opterećenja, može se smatrati da sezona nema utjecaja na potrošnju i maksimalno opterećenje. Ne postoji međutim zapreka da se i te oscilacije ako su znatne, uzmu u obzir, ali tada je potrebno poći od sređenih dijagrama dnevnih maksimalnih opterećenja termoelektrana posebno za svaku sezonu ili u krajnjem slučaju za svaki mjesec.

Potrošače treba grupirati prema veličini $\varkappa_w$ (npr. tekstilna, prehrambena industrija i sl.), dok posebno treba razmatrati grupe naročito velikih potrošača kao što su tvornice karbida, elektrolize aluminija i sl.

Osim toga treba razlikovati potrošače, koji stalno rade s konstantnom ili praktički s konstantnom snagom, te potrošače koji uzimaju konstantnu i varijabilnu energiju odnosno samo varijabilnu energiju. Kako je spomenuto, snage za pojedine potrošače, koje se unose u dijagram, jednake su opterećenjima u momentu maksimalnog opterećenja sistema, pa to pravilo vrijedi za sve gore spomenute potrošače. Da bi naznačili o kakvom potrošaču se radi uz indeks, koji označuje redni broj potrošača, stavljen je još indeks k ili v već prema tome da li se radi o potrošačima koji trebaju samo konstantnu (potrošači 1, 2 i 4) ili samo varijabilnu energiju (potrošač 3 na sl. 108). Za potrošača, koji treba i varijabilnu i konstantnu energiju (potrošač 5) posebno je označena konstantna, a posebno varijabilna snaga. Osim toga za svakog potrošača koji troši varijabilnu energiju označen je faktor opterećenja za varijabilni dio, koji je određen iz relacije

$$m_{nv} = \frac{r t_{nv}}{24\,(r+n)} \tag{210}$$

gdje je t_{nv} trajanje korištenja opterećenja P_{hv} n-tog potrošača u momentu maksimalnog opterećenja u radnom danu.

Na sl. 108a prikazane su maksimalne snage koje trebaju potrošači, ali to ne znači da je u svakom slučaju isto tolika snaga termoelektrana potrebna da bi se zadovoljio promatrani potrošač.

Razmotrimo najprije prilike kad su termoelektrane potrebne samo u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja, dakle kad hidroelektrane imaju dovoljno varijabilne energije i snage da pokriju cijeli varijabilni dio dijagrama opterećenja. Takvo stanje odgovara slučajevima (8) i (15) na sl. 70. Ako potrošač troši konstantnu energiju, za njegovo zadovoljenje potrebna je upravo onolika snaga termoelektrana, kolika je njegova potražnja, dakle u slučaju potrošača (1) možemo pisati $P_{1k} = P_{1t}$, pa to unosimo u novi dijagram na sl. 108 b. To isto

vrijedi za potrošača (2) i (4). Potrošaču (3) je potrebna samo varijabilna energija s faktorom opterećenja definiranim relacijom (210). Da bi opskrbili takvog potrošača nije potrebna snaga termoelektrana jednaka potrebnoj snazi u času maksimalnog opterećenja, jer — u slučajevima (8) i (15) — postoji dovoljna varijabilna snaga i energija hidroelektrana. Da to pokažemo poslužimo se primjerom u tab. 25, koja je načinjena za slučaj (15). Može se naime pokazati da imamo istu situaciju za slučaj (8) iz sl. 70. Ako želimo, dakle, eliminirati redukciju potrošača, koji troši samo varijabilnu energiju, potrebnu snagu termoelektrana određujemo iz izraza

$$P_{nt} = m_{nv} P_{nv} \tag{211}$$

jer u promatranom slučaju za eliminiranje redukcije ne manjka snaga već samo energija, a taj manjak energije eliminira se proizvodnjom

Tab. 25. Primjer za određivanje utjecaja eliminiranja redukcije za potrošača kojemu je potrebna samo varijabilna energija, kad prilike u sistemu odgovaraju slučaju 15 na sl. 70.

	oznake		Prije eliminiranja redukcije		Nakon eliminiranja redukcije	
	za energiju	za snagu	Energija GWh	Snaga MW	Energija GWh	Snaga MW
Ukupno						
hidroelektrane	W_h	$P_{h\max}$	705,0	1670,0	705,0	1670,0
potrebe	W_m	$P_{\max}$	1080,0	2100,0	1100,0	2150,0
razlika	ΔW	ΔP	−375,0	−430,0	−395,0	−480,0
Varijabilni dio						
hidroelektrane	W_{hv}	P_{hv}	340,0	1170,0	340,0	1170,0
potrebe	W_{mv}	P_{mv}	277,0	1000,0	297,0	1050,0
razlika	ΔW_v	ΔP_v	+ 63,0	+ 170,0	+ 43,0	+ 120,0
iz konstantnog dijela	ΔW_{hk}	ΔP_{hk}	—	—	—	—
u konstantni dio	ΔW_{hv}	ΔP_{hv}	− 63,0	− 86,3	− 43,0	− 58,9
termoelektrane	W_{tv}	P_{tv}	—	—	—	—
neiskorišteno	δW_{hv}	δP_{hv}	—	− 83,7	—	− 61,1
Konstantni dio						
hidroelektrane	W_{hk}	P_{hk}	365,0	500,0	365,0	500,0
potrebe	W_{mk}	P_{mk}	803,0	1100,0	803,0	1100,0
razlika	ΔW_k	ΔP_k	−438,0	−600,0	−438,0	−600,0
iz varijabilnog dijela	ΔW_{hv}	ΔP_{hv}	+ 63,0	+ 86,3	+ 43,0	+ 58,9
u varijabilni dio	ΔW_{hk}	ΔP_{hk}	—	—	—	—
termoelektrane	W_{tk}	P_{tk}	+ 375,0	+ 513,7	+ 395,0	+ 541,1
neiskorišteno	δW_{hk}	δP_{hk}	—	—	—	—
ukupno termoelektrane	W_t	P_t	375,0	513,7	395,0	541,1
ukupno neiskorišteno	δW_h	δP_h	—	83,7	—	61,1

termoelektrana u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja. To pokazuje i primjer u tab. 25, gdje je za potrošača od 50 MW i 20 GWh potrebna snaga termoelektrana od 27,4 MW, jer je faktor opterećenja $m_{3v} = 0{,}548$. Za potrošača (5) vrijedi analogno s tim da posebno razmatramo konstantno opterećenje, a posebno varijabilno opterećenje. Dakle, za slučaj kad su termoelektrane potrebne samo u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja, redukcija se bilo kakvog potrošača može eliminirati termoelektranama, koje imaju snagu jednaku srednjem opterećenju potrošača.

Tako jednostavnu situaciju nemamo u slučaju kad termoelektrane treba da rade i u konstantnom i u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja, iako za potrošače s konstantnom snagom vrijedi sve ono kazano ranije. Ali kad promatramo potrošače, koji trebaju varijabilnu energiju moramo razlikovati dva moguća slučaja. Prvi, kad je maksimalna snaga hidroelektrana manja od maksimalnog opterećenja, dakle, kad

Tab. 26. Primjer za određivanje utjecaja eliminiranja redukcije za potrošača kojemu je potrebna samo varijabilna energija, kad prilike u sistemu odgovaraju slučaju 16 na sl. 70.

	oznake		Prije eliminiranja redukcije		Nakon eliminiranja redukcije	
	za energiju	za snagu	Energija GWh	Snaga MW	Energija GWh	Snaga MW
Ukupno						
hidroelektrane	W_h	$P_{h\max}$	997,0	1890,0	997,0	1890,0
potrebe	W_m	$P_{\max}$	1080,0	2100,0	1100,0	2150,0
razlika	ΔW	ΔP	— 83,0	—210,0	—103,0	—260,0
Varijabilni dio						
hidroelektrane	W_{hv}	P_{hv}	340,0	990,0	340,0	990,0
potrebe	W_{mv}	P_{mv}	277,0	1000,0	297,0	1050,0
razlika	ΔW_v	ΔP_v	+ 63,0	— 10,0	+ 43,0	— 60,0
iz konstantnog dijela	ΔW_{hk}	ΔP_{hk}	—	—	—	—
u konstantni dio	ΔW_{hv}	ΔP_{hv}	— 81,2	—111,4	— 65,5	— 89,7
termoelektrane	W_{tv}	P_{tv}	+ 18,2	+ 121,4	+ 22,5	+ 149,7
neiskorišteno	δW_{hv}	δP_{hv}	—	—	—	—
Konstantni dio						
hidroelektrane	W_{hk}	P_{hk}	657,0	900,0	657,0	900,0
potrebe	W_{mk}	P_{mk}	803,0	1100,0	803,0	1100,0
razlika	ΔW_k	ΔP_k	—146,0	—200,0	—146,0	—200,0
iz varijabilnog dijela	ΔW_{hv}	ΔP_{hv}	+ 81,2	+ 111,4	+ 65,5	+ 89,7
u varijabilni dio	ΔW_{hk}	ΔP_{hk}	—	—	—	—
termoelektrane	W_{tk}	P_{tk}	+ 64,8	+ 88,6	+ 80,5	+ 110,3
neiskorišteno	δW_{hk}	δP_{hk}	—	—	—	—
ukupno termoelektrane	W_t	P_t	83,0	210,0	103,0	260,0
ukupno neiskorišteno	δW_h	δP_h	—	—	—	—

je $P_{h\,\max} < P_{\max}$, i drugi, kad je $P_{h\,\max} > P_{\max}$. U prvom slučaju mogu nastupiti slučajevi (15) do (18), a u drugom slučajevi (8) i (9) iz sl. 70. U ostalim slučajevima iz sl. 70 ne može praktički doći u pitanje potreba redukcije, jer se uvijek radi o slučajevima s relativno velikim raspoloživim količinama vode.

Promotrimo najprije prilike kad je $P_{h\,\max} < P_{\max}$. U slučajevima (15), (16) i (18) potrebna snaga termoelektrana za eliminiranje redukcije jednaka je potražnji potrošača u času maksimalnog opterećenja. Da se to pokaže načinjen je primjer u tab. 26, koji vrijedi za slučaj (16) Jedino u slučaju (17) imamo nešto drukčiju situaciju, jer tada u varijabilnom dijelu imamo manjak energije, a višak snage, pa je potrebno za eliminiranje redukcije proizvesti potrebnu energiju sa što manjom snagom termoelektrana. Za izradu bilanca u poglavlju IV 3b računali smo — radi sigurnosti — da maksimalno moguće iskorištenje snage termoelektrana iznosi $rt_{tv\,\max}$. Međutim, ako je trajanje korištenja potražnje potrošača u času maksimalnog opterećenja sistema rt_{nv} veće od $rt_{tv\,\max}$, sigurno je, da će se snagom termoelektrana P_{nt} koja je jednaka potražnji potrošača P_{nv} moći proizvesti upravo tolika energija kolika je potrebna promatranom potrošaču, pa će faktor opterećenja varijabilne snage termoelektrana biti jednak faktoru opterećenja potrošača. Ako je nasuprot tomu $rt_{nv} < rt_{tv\,\max}$, bit će iz termoelektrana potrebna manja snaga, jer će se potrebna energija sada moći proizvoditi s duljim trajanjem korištenja. Potrebna snaga termoelektrana sada iznosi

$$P_{nt} = \frac{rt_{nv}}{rt_{tv\,\max}} P_{nv} \tag{212}$$

Da se to pokaže, u tab. 27 prikazan je primjer za $rt_{nv} = 200$ sati/mjesec i za $rt_{tv\,\max} = 360$ sati/mjesec. Slučaj kad je $rt_{nv} < rt_{tv\,\max}$ dosta je rijedak, jer normalno potrošači s malim rt_{nv} imaju veliki $\varkappa_w$, pa i ne dolaze na red da ih se reducira, a osim toga to ima samo onda utjecaja kad nastupi slučaj (17) iz sl. 70. Radi toga za praktične račune je dovoljno da smatramo da se pojavljuju samo slučajevi (15), (16) ili (18), iako nema principijelnih poteškoća da se uzme u obzir i slučaj (17) ako se često pojavljuje, ali je tada potrebno odijeliti slučaj (17) od ostalih slučajeva, što dovodi do praktičnih poteškoća.

Kad je $P_{h\,\max} > P_{\max}$, dolazi u obzir samo slučaj (9), jer za slučaj (8) nema potrebe za termoelektranama u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja. Sada vrijedi sve ono rečeno za slučaj (17), s razlikom što sada možemo jednostavno uzeti u obzir i prilike kad je $rt_{nv} < rt_{tv\,\max}$

Na osnovu gore navedenih razmatranja moguće je iz dijagrama na sl. 108 a, koji pokazuje potražnju potrošača u momentu maksimalnog opterećenja, prijeći na dijagram na sl. 108 b, koji prikazuje potrebne snage termoelektrana za zadovoljenje potreba potrošača odnosno potrebnu snagu termoelektrana za eliminiranje redukcije potrošača.

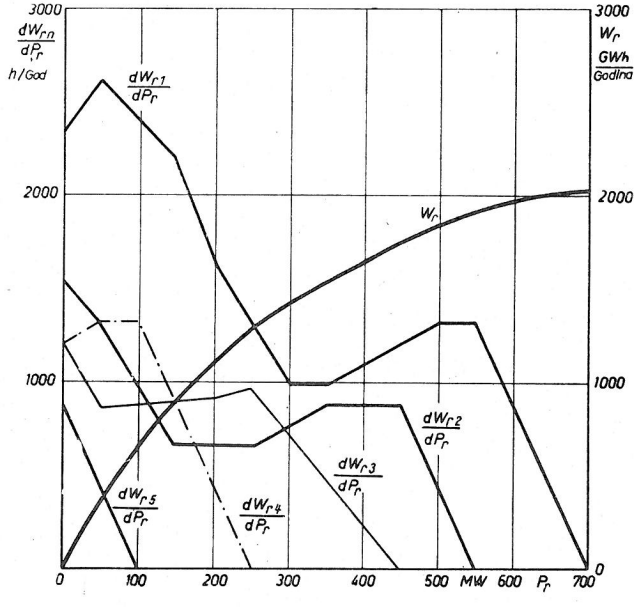
Tab. 27. Primjer za određivanje utjecaja eliminiranja redukcije za potrošača kojemu je potrebna samo varijabilna energija, kad je mjesečno trajanje iskorištenja varijabilneog opterećenja potrošača rt_{nv} manje od pretpostavljenog maksimalnog mjesečnog trajanja iskorištenja snage termoelektrana $rt_{tv\max}$ u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja.

	oznake		Prije eliminiranja redukcije		Nakon eliminiranja redukcije	
	za energiju	za snagu	Energija GWh	Snaga MW	Energija GWh	Snaga MW
Ukupno						
hidroelektrane	W_h	$P_{h\max}$	917,0	2080,0	917,0	2080,0
potrebe	W_m	$P_{\max}$	1090,0	2100,0	1100,0	2150,0
razlika	ΔW	ΔP	—173,0	— 20,0	—183,0	— 70,0
Varijabilni dio						
hidroelektrane	W_{hv}	P_{hv}	260,0	1180,0	260,0	1180,0
potrebe	W_{mv}	P_{mv}	287,0	1000,0	297,0	1050,0
razlika	ΔW_v	ΔP_v	— 27,0	+180,0	— 37,0	+130,0
iz konstantnog dijela	ΔW_{hk}	ΔP_{hk}	—	—	—	—
u konstantni dio	ΔW_{hv}	ΔP_{hv}	—	—	—	—
termoelektrane	W_{tv}	P_{tv}	+ 27,0	+ 75,0	+ 37,0	+102,8
neiskorišteno	δW_{hv}	δP_{hv}	—	+225,0	—	—232,8
Konstantni dio						
hidroelektrane	W_{hk}	P_{hk}	657,0	900,0	657,0	900,0
potrebe	W_{mk}	P_{mk}	803,0	1100,0	803,0	1100,0
razlika	ΔW_k	ΔP_k	—146,0	—200,0	—146,0	—200,0
iz varijabilnog dijela	ΔW_{hv}	ΔP_{hv}	—	—	—	—
u varijabilni dio	ΔW_{hk}	ΔP_{hk}	—	—	—	—
termoelektrane	W_{tk}	P_{tk}	+146,0	+200,0	+146,0	+200,0
neiskorišteno	δW_{hk}	δP_{hk}	—	—	—	—
ukupno termoelektrane	W_t	P_t	173,0	275,0	183,0	302,8
ukupno neiskorišteno	δW_h	δP_h	—	225,0	—	232,8

Određivanje potrebnih snaga termoelektrana vršeno je od manjeg $\varkappa_w$ prema većem, a to je važno, jer se reduciranjem jednog potrošača kojemu je potrebna varijabilna snaga smanjuje potrebna snaga termoelektrana u varijabilnom dijelu, pa se sve više širi područje u kojemu je potrebna samo konstantna energija iz termoelektrana, a prema tome i područje u kojemu se i varijabilna energija potrebna potrošačima može pokriti konstantnom energijom termoelektrana.

Površina u dijagramu na sl. 108 b ne prikazuje uvijek energije, pa su zato i uneseni podaci o faktoru opterećenja termoelektrana (m_t), dok su područja s različitim m_t za istog potrošača odijeljena crtkanom linijom. Množenjem površina s faktorom opterećenja termoelektrana dobiva se količina energije, koju treba da daju termoelektrane da bi se eliminirala redukcija potrošnje.

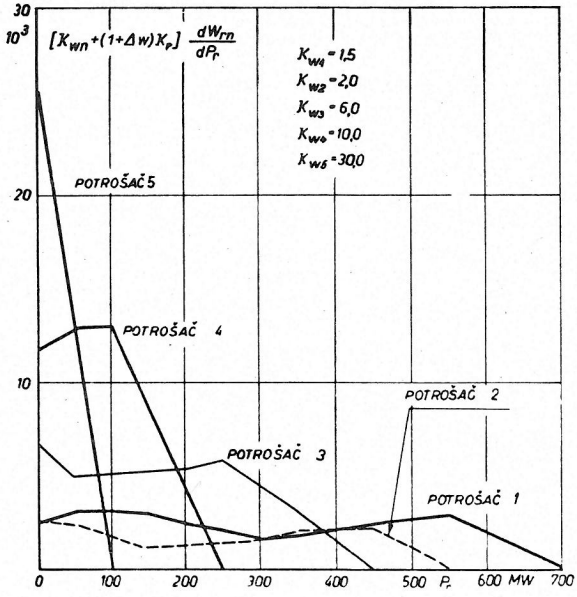
Prema tome dijagram sl. 108 b predstavlja osnovu za određivanje veličina dW_{rn}/dP_r i W_r, koje su potrebne za određivanje vrijednosti izraza (208), na temelju kojega se može — kako ćemo vidjeti — odrediti optimalna snaga $P_{r\,opt}$ definirana kao snaga za koju treba smanjiti redukciju da bi se postigao optimalni ekonomski rezultat. Kao što je



Sl. 109. Ovisnost dW_{rn}/dP_r i W_r o snazi P_r za primjer na sl. 108.

već ranije naglašeno, polazimo od raspoložive snage P_{to} koja je označena i na dijagramu sl. 108 b, pa ta vrijednost predstavlja veličinu $P_r = 0$. Veličine dW_{rn}/dP_r predstavlja vrijeme korištenja (sati/god) prirasta snage dP_r, pa je za $m_t = 1{,}00$ upravo jednako vremenu očitanom na apscisi, dok za $m_t < 1{,}00$ treba očitana vremena množiti s faktorom opterećenja m_t. Vrijednost dW_{rn}/dP_r treba odrediti za svaku grupu potrošača posebno. Na sl. 109 prikazane su vrijednosti dW_{rn}/dP_r za svih pet grupa potrošača na sl. 108. Na istoj slici nacrtana je ovisnost $W_r = f(P_r)$ također prema sl. 108 uzevši u obzir fakore opterećenja. Da bi dobili vrijednost prvog člana jednadžbe (208) pretpostavljeno je — primjera radi — da $\varkappa_w$ ima redom slijedeće vrijednosti: 1,5, 2, 6, 10 i 30, te da se $\varkappa_r$ linearno (kao prva aproksimacija) mijenja s porastom P_r, pa za $P_r = 0$ iznosi 0,4, a za $P_r = 700$ MW $\varkappa_r = -1{,}0$. Zanemarene su veličine Δp i Δw. Uz takve pretpostavke dobivamo sumande prvog člana izraza (208), kako je prikazano na sl. 110, a njihovu sumu prikazuje krivulja (a) na sl. 111. Treba napomenuti, da članovi jednadžbe

(208) imaju dimenziju sati/god, jer su sve novčane veličine prikazane u odnosu na specifične dodatne troškove u najekonomičnijoj termoelektrani ($k_{b\,\min}$). Množenjem pojedinih članova s $k_{b\,\min}$ dolazimo do dimenzije Din/kW, god. Treći član dobivamo množenjem energije W_r s $d\varkappa_r/dP_r$, koji uz učinjene pretpostavke iznosi — 2,0 · 10^{-6} po kW.



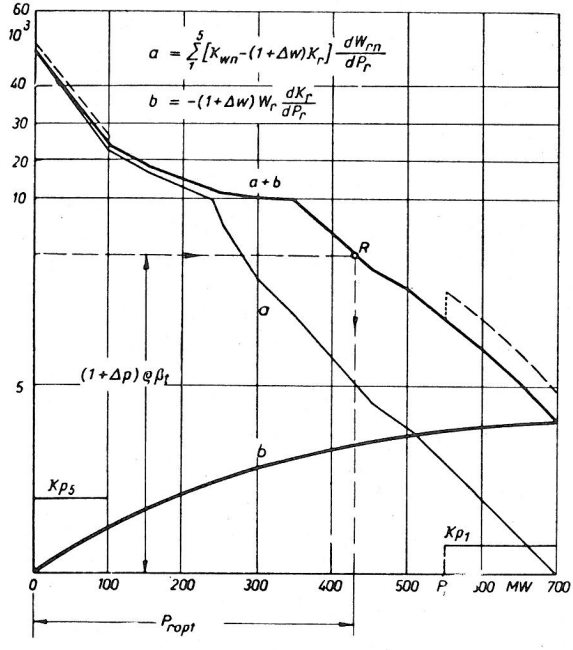
Sl. 110. Ovisnost prvog člana na desnoj strani izraza (208) o P_r za pojedine grupe potrošača za primjer na sl. 108.

Treći član na sl. 111 prikazan je krivuljom *b*. Zbrajanjem krivulja *a* i *b* dolazimo do zbroja prvog i trećeg člana (krivulja $a + b$), čemu treba dodati veličinu $\varkappa_p$ i to samo u onom području kad se mijenja maksimalna reducirana snaga potrošača. U našem primjeru pretpostavljeno je da samo prvi i peti potrošač imaju $\varkappa_p > 0$, pa je za područje od 550 do 700 MW za potrošače 1 ucrtana i dodana krivulji $a + b$ vrijednost $\varkappa_{p1}$, a za područje od 0 do 100 MW vrijednost $\varkappa_{p5}$.

Sada konačno imamo krivulju koja prikazuje desnu stranu jednadžbe (208), pa povlačenjem horizontale u udaljenosti od apscise koja odgovara lijevoj strani spomenute jednadžbe dolazimo do sjecišta *R* (sl. 111), kojim je određena optimalna snaga $P_{r\,opt}$.

Ako tu snagu prenesemo u dijagram na sl. 108, moći ćemo konstatirati, da treba računati s redukcijama prvih triju grupa potrošača. Također možemo očitati i broj sati redukcija. Pri tom ne treba zaboraviti kako je došlo do dijagrama na sl. 108, pa je najpovoljnije sate pretvoriti

u dane, i utvrditi kroz koliko će se dana pojavljivati potreba redukcije. Možemo dakle ustanoviti da će se u našem primjeru potreba redukcije pojaviti kroz 92 dana u godini. Taj broj dana vrijedi istodobno za potrošača (1), dok će za potrošača (2) biti potrebno reducirati potrošnju kroz 44 dana, a za potrošača (3)kroz 8 dana/godišnje. Za potrošače



Sl. 111. Ovisnost desne strane izraza (208) o P_r za primjer na sl. 108, te primjer određivanja optimalnog opsega redukcije P_{ropt}.

s faktorom opterećenja 1,0 broj dana redukcije znači i stvarni broj dana obustave pogona, dok za potrošače s faktorom opterećenja manjim od 1 u broj dana redukcije uključeni su i neradni dani, koji padaju između radnih dana kad će redukcija biti potrebna, jer se ne može zamisliti da bi takav potrošač reduciran u radnom danu radio samo u neradnom danu, iako bi to energetski bilo moguće.

Konačno treba napomenuti da broj dana kad će biti potrebna redukcija predstavlja samo prosjek broja dana u nizu godina, pa će se pojaviti godine s kraćim i duljim trajanjem redukcije.

4. Utjecaj prilika u elektroenergetskom sistemu na opseg redukcije

Na opseg redukcije odlučujući utjecaj ima prvi član jednadžbe (208).

Veličina $\varkappa_{wn}$ ovisi o vrstama potrošača, pa će u elektroenergetskom sistemu, u kojemu postoje veliki potrošači s malim $\varkappa_w$ i krivulja (a) na sl. 111 imati male ordinate, što će dovesti do velikog $P_{r\,opt}$. To znači da će biti povoljno reducirati relativno velike snage odnosno izgraditi malo dodatne snage u termoelektranama radi eliminiranja redukcije. Dakle, uspoređujući optimalni opseg redukcije u dva elektroenergetska sistema, koji se međusobno razlikuju samo u strukturi potrošača, možemo kazati, da će biti opravdane veće redukcije u onom elektroenergetskom sistemu u kojemu postoji veći postotak potrošača s malim $\varkappa_w$ odnosno u kojemu postoji veći postotak potrošača s lučnim pećima, velikim elektrolizama i sl.

Na ostale dvije veličine $\varkappa_r$ i dW_r/dP_r, koje su od značenja za prvi član desne strane jednadžbe (208) utječu struktura potrošača u sistemu i udio hidroenergije u ukupnoj potrošnji sistema. Struktura potrošača ima utjecaja, jer o njoj ovisi oblik dnevnog dijagrama opterećenja, pa prema tomu o njoj ovisi i oblik krivulje trajanja opterećenja. Taj je utjecaj međutim manji od utjecaja udjela hidroenergije h_j na oblik krivulje trajnja opterećenja termoelektrana.

Za veći udio hidroenergije u ukupnoj proizvodnji elektroenergetskog sistema veličina $\varkappa_r$ postaje sve manja, pa s porastom h_j vrijednost u uglatoj zagradi jednadžbe (208) postaje sve veća, te bi se u prvi čas moglo zaključiti kao da cijeli prvi član raste. U tom prvom članu međutim dolazi i diferencijalni kvocijent dW_{rn}/dP_r, koji postaje sve manji što je veći udio hidroenergije. Zbog toga što $\varkappa_r$ dolazi u zbroju s $\varkappa_{wn}$, kao i zbog toga što je normalno $\varkappa_{wn} > |\varkappa_r|$, te uzevši u obzir provedene detaljnije analize, može se zaključiti da na numeričku vrijednost prvog člana desne strane jednadžbe (208) ima veći utjecaj veličina dW_{rn}/dP_r od veličine $\varkappa_r$. Prema tome prvi član desne strane jednadžbe (208) postaje sve manji (uz istu strukturu potrošača) s porastom udjela hidroenergije u ukupnoj proizvodnji.

Prema tome u elektroenergetskom sistemu u kojemu znatan postotak od ukupne potrošnje predstavljaju potrošači s malim $\varkappa_w$ i u kojemu je udio hidroenergije h_j velik, bit će opravdane i znatne redukcije potrošnje.

5. Utjecaj elektroenergetskog sistema na velike potrošače koji se povremeno reduciraju

Djelomična ili potpuna povremena obustava dobave energije za pojedine potrošače ima dvije nepovoljne posljedice s obzirom na eksploataciju proizvođačkog postrojenja: nekontinuiranost pogona tokom godine i varijacije godišnje proizvodnje.

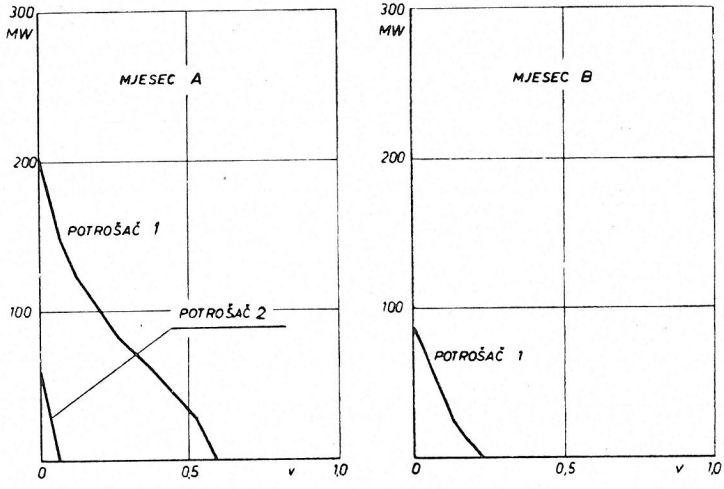
Nekontinuiranost pogona tokom godine ima negativne posljedice, koje smo već ranije naveli i koje smo uključili u izraz za određivanje optimalnog opsega redukcije, ali ima i negativno, što nije moguće sa sigurnošću utvrditi kad će se tokom godine pojaviti djelomične ili potpune redukcije. Ta nesigurnost predviđanja predstavlja svakako poteškoću za potrošače, a pogotovo kad ne postoji uska suradnja između elektroprivrede i takvih potrošača. Za vrijeme obustave pogona potrošači će naravno nastojati da izvrše nužne popravke i eventualne rekonstrukcije na postrojenjima, kako bi izgubili što manje vremena u razdoblju, kad električna energija stoji na raspolaganju. Za sve to potrebno je pripremiti materijal i osoblje, pa bi za potrošače bilo od velike važnosti unaprijed znati kad će doći do obustave pogona i koliko će ta obustava trajati. U elektroenergetskom sistemu, u kojemu su hidroelektrane na vodotocima, koji dobivaju vodu pretežno od glečera i leda, sigurnost predviđanja je svakako veća nego u elektroenergetskim sistemima, koji svoju proizvodnju iz hidroelektrana baziraju na vodotocima čiji protoci ovise neposredno o oborinama. Postojanje većih akumulacionih bazena povećava svakako sigurnost predviđanja proizvodnje hidroelektrana, a prema tome i predviđanja potreba redukcije. Međutim predviđanja na dulje razdoblje unaprijed predstavljaju uvijek znatne poteškoće, kako u sistemima s malom mogućnošću akumuliranja, tako i u sistemima sa znatnim akumulacijama zbog nepoznavanja vremenskog rasporeda i količine voda, koje će dotjecati elektranama i u akumulacione bazene. Normalno sigurnija su predviđanja za razdoblje malih voda, jer su tada oscilacije vjerojatnih protoka mnogo manje nego u razdoblju srednjih i velikih voda, a osim toga i korištenje akumulacija tako se regulira, da se osiguraju znatnije količine akumulirane vode za razdoblje malih voda.

Iz svih tih razloga ne izgleda povoljno reguliranje potrošnje onih potrošača, koji se povremeno reduciraju, pomoću tarifa, kojima se određuje npr. da će se za utrošenu energiju ili za angažiranu snagu u unaprijed određenim mjesecima naplaćivati viši tarifni stav. Može se naime dogoditi da se u mjesecima, u kojima je predviđen niži tarifni stav, pojavi potreba smanjenja potrošnje, a baš će tada potrošači s malim $\varkappa_w$ raditi punim kapacitetom. Također će doći do štete, ako u razdoblju višeg tarifnog stava dođe do smanjenja potrošnje, a elektroenergetski kapaciteti ostaju istodobno neiskorišteni. Potrebno je dakle naći elastičniji sistem, koji bi omogućio bolje prilagođavanje potrošnje s mogućnostima proizvodnje s težnjom da se što bolje iskoriste i industrijski i elektroprivredni kapaciteti.

U svakom slučaju međutim potrebno je poznavati vjerojatnosti pojave redukcija za pojedina vremenska razdoblja, kako bi se mogla utvrditi eventualna potreba redukcije potrošnje. Vjerojatnosti pojave redukcija mogu se utvrditi na osnovu poznavanja hidroloških prilika za niz godina unatrag za hidroelektrane koje će se u promatranoj godini nalaziti u pogonu, kao i na osnovu raspoložive snage termoelektrana. Nakon što su određene potrebne redukcije za svaki mjesec posebno

u nizu godina, mogu se nacrtati krivulje kao na sl. 112, koje za dva mjeseca, kao primjer, prikazuju vjerojatnost pojave redukcije za dvije grupe potrošača. U mjesecu A djelomična redukcija potrošača (1) može se očekivati s vjerojatnošću od 0,57, dok se potpuna obustava istog može očekivati s vjerojatnošću od 0,05. S istom vjerojatnošću može se očekivati djelomična redukcija potrošača (2), dok ne treba očekivati potpune obustave potrošača (2). U mjesecu B ne treba očekivati potpune obustave potrošača (1), niti uopće redukciju potrošača (2).

Krivulje kao na sl. 112 mogu naravno dati samo opću sliku o vjerojatnosti potrebe redukcija, ali ne mogu nam odgovoriti na pitanje kad će se pojaviti potreba redukcije određenog potrošača. Krivulje kao na sl. 112 međutim mogu dati osnovnu orijentaciju o očekivanom vremenskom rasporedu redukcija, pa mogu poslužiti za aproksimativno planiranje obustava. Znatno tačnija predviđanja mogu se učiniti tek za mjesec-dva unaprijed na osnovu stanja u akumulacionim bazenima i protocima uzevši u obzir karakteristike vodotoka. Općenito se može reći, da su predviđanja to nesigurnija što je veći udio hidroenergije u ukupnoj proizvodnji i što je manja energetska vrijednost akumuacionih bazena.



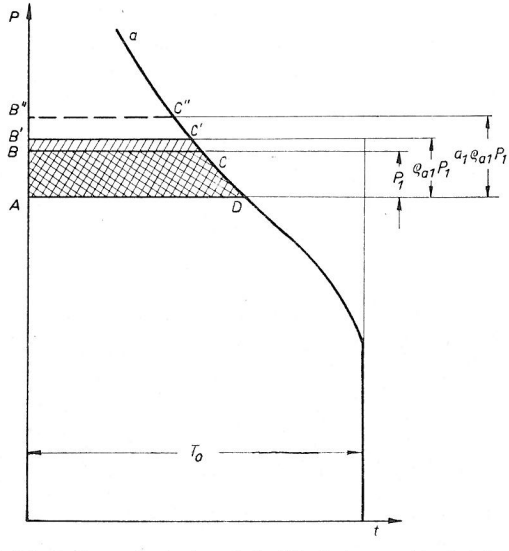
Sl. 112. Primjeri krivulja vjerojatnosti pojave redukcije

U svakom slučaju međutim elektroprivreda treba da vrši predviđanja i da o svojim ocjenama obavijesti velike potrošače, kako bi bili upoznati s izgledima za opskrbu električnom energijom u slijedećem vremenskom razdoblju.

Drugu poteškoću, koju smo već spomenuli, predstavljaju varijacije količina električne energije, koje stoje potrošačima na raspolaganju

odnosno varijacije količine proizvoda, koje može godišnje proizvesti industrija, koja je izvrgnuta redukcijama. Te varijacije možemo prikazati kao promjenu iskorištenja maksimalnog godišnjeg kapaciteta potrošača. Maksimalnim godišnjim kapacitetom potrošača smatramo sumu prosječnih mjesečnih kapaciteta, a do prosječnog mjesečnog kapaciteta dolazimo, ako pretpostavimo, da se remont postrojenja vrši kontinuirano tokom cijele godine. Ako međutim računamo, da se sav remont vrši samo u nekim mjesecima, bit će moguće u mjesecima kad nema remonta ostvariti veću mjesečnu potrošnju energije od one koja odgovara prosječnom mjesečnom kapacitetu, jer će tada biti moguće ostvariti i maksimalni mjesečni kapacitet. Ako s P_1 označimo potrebnu srednju snagu za ostvarenje srednjeg mjesečnog kapaciteta, potrebna snaga za pogon s maksimalnim kapacitetom iznosit će $\varrho_a P_1$, gdje $\varrho_a > 1$, a možemo ga nazvati faktorom rezerve potrošača. Snaga P_1 je ona snaga s kojom treba provesti račun za određivanje optimalnog opsega redukcije.

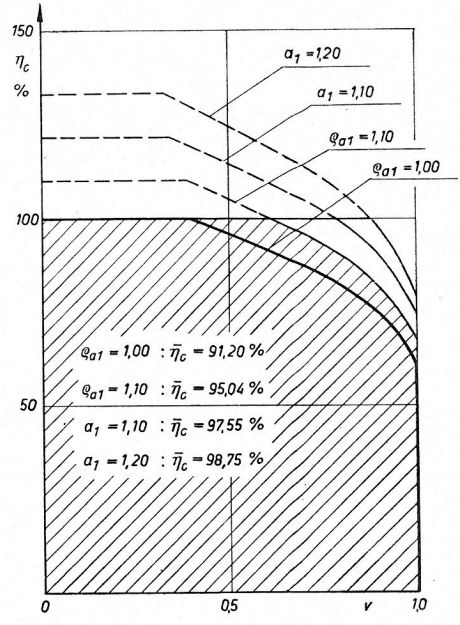
Poznavajući hidrološke prilike u nizu godina, možemo odrediti iskorištenje kapaciteta potrošača za svaku godinu posebno. Krivulja a (sl. 113) predstavlja krivulju trajanja sume maksimalno dnevno isko-



Sl. 113. Položaj potrošača, koji se prvi reducira, u krivulji trajanja sume iskoristivih snaga hidroelektrana i raspoloživih snaga termoelektrana u jednoj od promatranih godina. P_1 srednje opterećenje potrošača uz pretpostavku da se remont vrši tokom cijele godine. $\varrho_{a1} P_1$ opterećenje potrošača kad nema remonta, $a_1 \varrho_{a1} P_1$ opterećenje uz povećani kapacitet.

ristivih snaga hidroelektrana i raspoloživih snaga termoelektrana u jednoj od razmatranih godina, pa je iskoristivost kapaciteta (η_c) — ako ne računamo s radom s maksimalnim kapacitetom van razdoblja

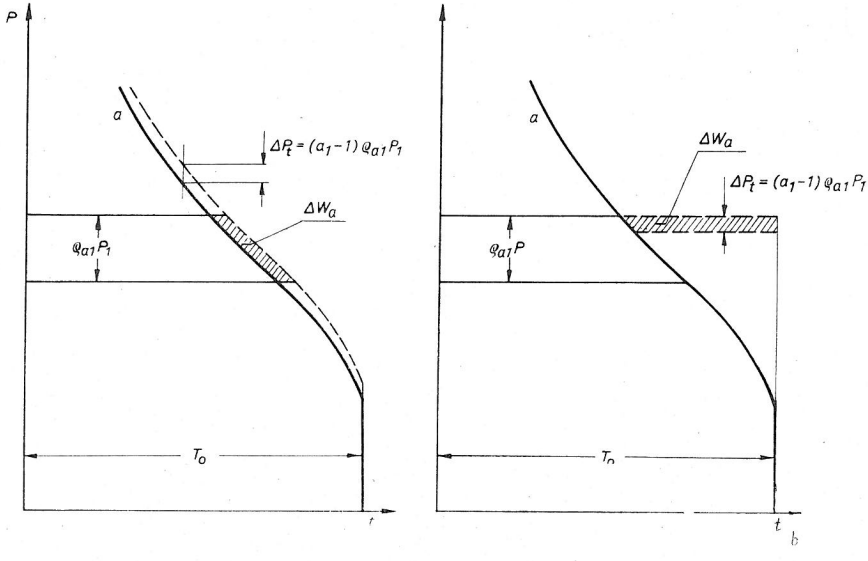
redukcija — omjer između površine $ABCD$ i pravokutnika površine P_1T_0. Ako taj postupak ponovimo za niz godina, doći ćemo do krivulje vjerojatnosti iskoristivosti kapaciteta, čiji je jedan primjer prikazan na sl. 114 (krivulja $\varrho_{a1} = 1{,}00$). Korištenjem maksimalnog kapaciteta u razdoblju kad ima raspoložive energije i snage, a izvršenjem remonta u razdoblju pomanjkanja energije, može se povećati iskorištenje kapaciteta, pa je to iskorištenje tada jednako omjeru između površine $AB'C'D$ i istog pravokutnika P_1T_0 (sl. 113). Vjerojatnost iskorištenja kapaciteta uz takav način pogona prikazuje krivulja označena s $\varrho_{a1} = 1{,}10$ na sl. 114. Ta krivulja je određena uz pretpostavku da je dio krivulje (a) od C' do D pravac određenog nagiba, te da je faktor rezerve potrošača $\varrho_{a1} = 1{,}10$. Pogon s maksimalnim kapacitetom u energetski povoljnim razdobljima donosi poboljšanje i u pogledu prosječnog iskorištenja kapaciteta (podaci za $\bar{\eta}_c$ na sl. 114), i u pogledu vjerojatnosti punog korištenja kapaciteta, pa i u pogledu varijacija korištenja kapaciteta.



Sl. 114. Vjerojatnost godišnje iskoristivosti kapaciteta potrošača (η_c) uz korištenje srednje snage potrošača kad se remont vrši tokom cijele godine ($\varrho_{a1} = 1{,}00$), kad se remont vrši u razdoblju pomanjkanja energije ($\varrho_{a1} = 1{,}10$) te kad postoji dodatni kapacitet od 10% ($a_1 = 1{,}10$) i 20% ($a_1 = 1{,}20$). $\bar{\eta}_c$ prosječna godišnja iskoristivost kapaciteta potrošača.

Daljnje poboljšanje moguće je postići povećanjem kapaciteta industrije, koje definiramo veličinom $a_1 > 1$, a koja predstavlja omjer između povećanog i osnovnog kapaciteta. Taj se povećani kapacitet

koristi također u energetski povoljnim razdobljima (sl. 113), a iskoristivost kapaciteta prikazana je na sl. 114. Za $a_1 = 1{,}10$ i $a_1 = 1{,}20$ određena je iskoristivost na osnovu osnovnog kapaciteta, pa dodatni kapacitet služi samo za poboljšanje iskorištenja u sušnim godinama. U protivnom, kad bi dodatni kapacitet bio korišten uvijek kad je moguće, imali bi situaciju kao da se radi o većem potrošaču, pa bi — uz istu raspoloživu snagu iz termoelektrana — imali još manje prosječno iskorištenje kapaciteta i još veće varijacije korištenja kapaciteta. Naravno, kad bi računali s dodatnim kapacitetom kao s kapacitetom koji se koristi kad god je to moguće, trebalo bi ponovno provesti račun određivanja optimalnog opsega redukcije. Izgradnjom dodatnog kapaciteta poboljšava se — kako se vidi iz primjera na sl. 114 — prosječno

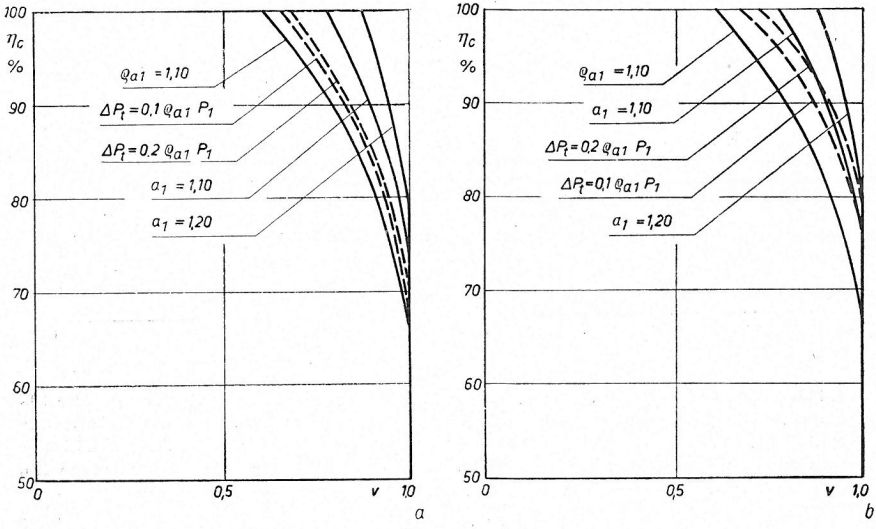


Sl. 115. Povećanje korištenja kapaciteta potrošača radi izgradnje termoelektrane raspoložive snage ΔP_t, koja se (*a*) koristi za opskrbu svih potrošača i koja se (*b*) koristi samo za opskrbu promatranog potrošača

iskorištenje osnovnog kapaciteta, osigurava se s većom vjerojatnošću puno iskorištenje osnovnog kapaciteta, te se postižu manje varijacije godišnjeg iskorištenja kapaciteta.

Usporedimo još kakav bi utjecaj na iskorištenje kapaciteta industrije imala izgradnja dodatne termoelektrane raspoložive snage, koja je jednaka snazi potrebnoj za dodatni kapacitet. Tada treba razlikovati dva slučaja: dodatna termoelektrana predstavlja dio elektroenergetskog sistema i njezina se proizvodnja dijeli potrošačima prema njihovom redoslijedu (redoslijed redukcije određen je prema veličini $\varkappa_w$), koji

je utvrđen prilikom određivanja optimalnog opsega redukcije (sl. 115 a), i dodatna termoelektrana predstavlja dio potrošača, a njezinom se proizvodnjom opskrbljuje isključivo promatrani potrošač (sl. 115 b). U prvom slučaju opskrba promatranog potrošača je znatno slabija (sl. 116 a) nego kad se poboljšanje iskoristivosti kapaciteta nastoji postići dodatnim kapacitetom potrošača, dok je u drugom slučaju — usprkos poboljšanju — ipak slabija nego kad se povećava kapacitet potrošača (sl. 116 b). Naravno, da primjer na sl. 116 vrijedi samo za učinjenu pretpostavku o nagibu krivulje (a) na sl. 115. Pretpostavljeno je, naime, da je omjer apscisa $\overline{BC} : \overline{AD} = 0{,}9$. Smanjenjem omjera apscisa povećat će se utjecaj povećanja snage termoelektrana, a smanjivat će se utjecaj povećanja kapaciteta potrošača. Omjer apscisa



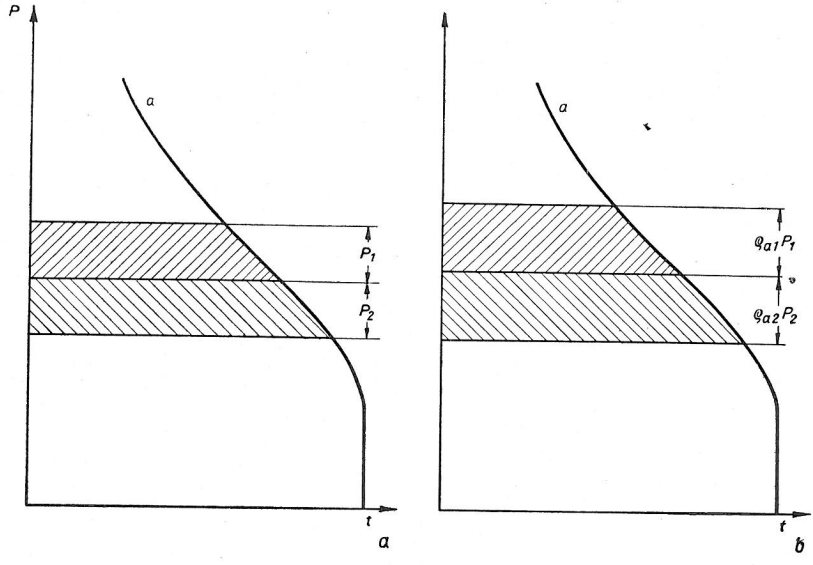
Sl. 116. Vjerojatnost iskoristivosti kapaciteta potrošača, radi izgradnje termoelektrane raspoložive snage ΔP_t za slučajeve (*a*) i (*b*) prikazane na sl. 115, a u usporedbi sa slučajevima prikazanim na sl. 114

ovisi o karakteristikama hidroelektrana u sistemu i o veličini snage potrebne potrošaču.

Može se međutim zaključiti da će praktički uvijek biti više ekonomski opravdano povećanje kapaciteta potrošača nego dodatna izgradnja termoelektrana ne samo radi povećanja iskoristivosti kapaciteta potrošača nego i radi manjih potrebnih investicija. Pri ocjeni ekonomske vrijednosti rješenja s dodatnom snagom termoelektrana, koja bi služila samo za povećanje iskorištenja kapaciteta, treba uzeti u obzir, da bi bilo neopravdano tu snagu termoelektrana koristiti za potrošače s manjim gubicima zbog redukcije, dok bi u isti čas bili redu-

cirani potrošači s većim gubicima, a baš su potrošači s malim gubicima izvrgnuti najvećim varijacijama iskorištenja kapaciteta.

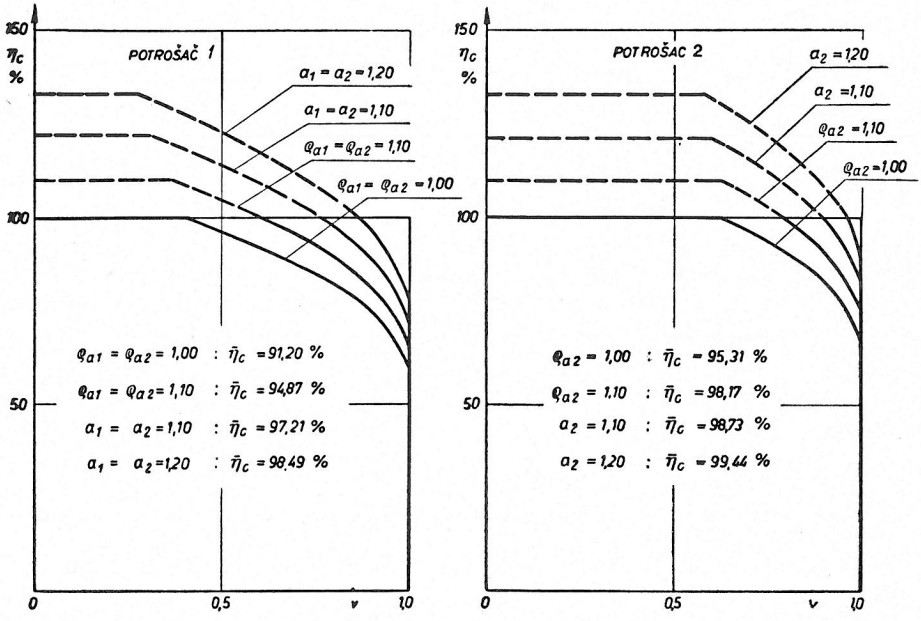
U dosadašnjim razmatranjima promatrane su prilike uz pretpostavku da se mjere za poboljšanje iskorištenja kapaciteta odnose na grupu potrošača s malom štetom zbog redukcije (najmanji $\varkappa_w$).



S. 117. Položaj dvaju potrošača, koji se reduciraju, u krivulji trajanja sume iskoristivih snaga hidroelektrana i raspoloživih snaga termoelektrana u jednoj od promatranih godina. (*a*) uz korištenje srednjeg opterećenja, koje dobivamo uz pretpostavku, da se remont vrši tokom cijele godine. i (*b*) uz korištenje maksimalnog opterećenja u razdobljima kad ima dovoljno energije na raspolaganju, a remont se vrši u razdobljima pomanjkanja energije.

Ako međutim spomenute mjere proširimo i na grupu potrošača sa slijedećim višim $\varkappa_w$, te će mjere utjecati i na potrošača s najmanjim $\varkappa_w$, bilo da se koristi kapacitet karakteriziran omjerom ϱ_a, bilo da se predvidi dodatni kapacitet karakteriziran omjerom a. Na sl. 117a prikazan je položaj potrošača bez korištenja rezervne snage, a na sl. 117b s korištenjem rezervne snage. Iskorištenje kapaciteta potrošača (1) uz korištenje rezervne snage potrošača (2) postaje manje radi pomaka potrošača (1) prema užem dijelu između krivulje (a) i osi ordinata. Istu situaciju imamo i u slučaju povećanja kapaciteta potrošača (2). Da se ukaže na te razlike, na sl. 118 prikazana je moguća iskoristivost kapaciteta potrošača (1) uz ostale pretpostavke koje vrijede za sl. 114. Osim toga je pretpostavljeno, da se istodobno za isti postotak povećava kapacitet potrošača (1) i potrošača (2), te da su potrebne snage za oba potrošača međusobno jednake.

Uspoređujući podatke za potrošača (1) s podacima za potrošača (2) (sl. 118), dolazimo do zaključka, da je utjecaj povećanja kapaciteta na poboljšanje iskoristivosti kapaciteta manji kod potrošača (2), nego kod potrošača (1). To još više vrijedi za potrošača, koji je smješten ispod potrošača (2) (na sl. 117) u usporedbi s potrošačem (1). Prema tome možemo zaključiti, da će se najveće povećanje iskorištenja kapaciteta dodatnim kapacitetom postići kod potrošača s najmanjim gubicima zbog redukcija.



Sl. 118. Vjerojatnost godišnje iskoristivosti kapaciteta (η_c) dvaju potrošača, koji se reduciraju, za slučajeve prikazane na sl. 113 a uz pretpostavku da oba potrošača imaju jednaka opterećenja.

Konačno, kad promatramo redukciju isporuke električne energije potrošačima, treba u nekim slučajevima unutar istog potrošača razlikovati pogone s različitim štetama zbog redukcije. Tako npr. unutar aluminijskog kombinata treba razlikovati fabrikaciju glinice, elektrolizu aluminija i valjaonicu. S obzirom na veličinu $\varkappa_w$ dolazit će do povremenih redukcija elektrolize aluminija, pa će možda biti korisno međusobno uskladiti kapacitete triju pogona, te predvidjeti mogućnost uskladištenja glinice za vrijeme smanjenja korištenja kapaciteta elektrolize, kao i mogućnost uskladištenja aluminijskih blokova za vrijeme korištenja rezervnog, a eventualno i dodatnog, kapaciteta elektrolize.

SEDMO POGLAVLJE

ENERGETSKA VRIJEDNOST HIDROELEKTRANA

1. Osnova za određivanje energetske vrijednosti hidroelektrana

a) Vrijednost hidroelektrane s obzirom na troškove

Radi pojednostavljenja prikaza razmotrimo prilike u nekom elektroenergetskom sistemu i u nekoj hidrološkoj godini, u kojemu su potrebe energije prikazane krivuljom (1), a maksimalna opterećenja u radnom danu krivuljom (3) na sl. 119. U tom elektroenergetskom sistemu postoje hidroelektrane, iz kojih se može iskoristiti energija prikazana krivuljom (2) i koje u momentu maksimalnog opterećenja proizvode snagu prikazanu krivuljom (4) na sl. 119. Razlika između krivulja (1) i (2), te između krivulja (3) i (4) prikazuje potrebnu proizvodnju odnosno potrebnu snagu iz termoelektrana. Za određivanje iskoristive energije i snage hidroelektrana, te za određivanje potrebne energije i snage termoelektrana može se npr. upotrijebiti metoda konstantne i varijabilne energije (Poglavlje IV 3).

Pored hidroelektrana, koje proizvode količinu energije W_{ho}, za zadovoljenje potreba su potrebne i termoelektrane, koje trebaju imati raspoloživu snagu P_{to}, te koje moraju proizvesti količinu energije W_t. Ukupni godišnji troškovi u sistemu iznose

$$K_1 = K_{ho} + \varrho\, b_t\, P_{to} + k_{bs}\, W_t \tag{213}$$

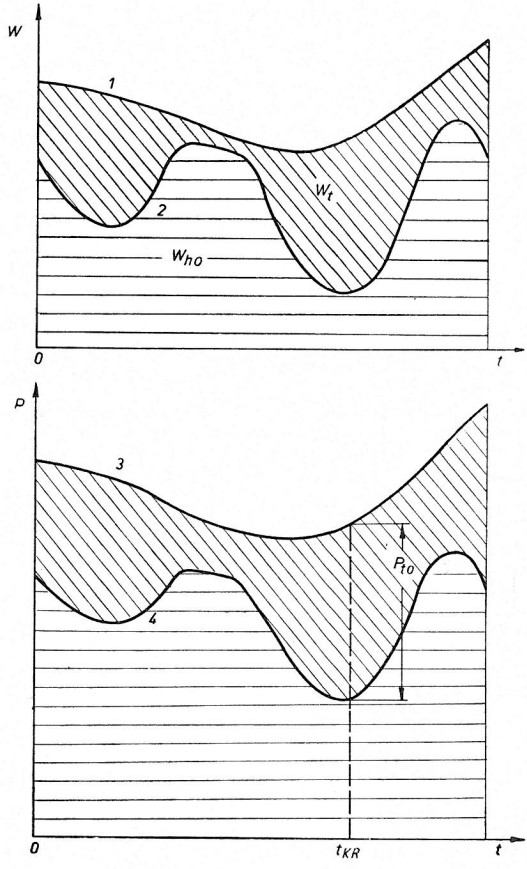
gdje su K_{ho} godišnji troškovi u postojećim hidroelektranama, ϱ faktor rezerve u termoelektranama, b_t godišnji specifični stalni troškovi po jedinici snage na pragu termoelektrana — $b_t = a_t\, B_t$, što je definirano relacijom (134) —, a k_{bs} prosječni specifični promjenljivi troškovi po kWh u termoelektranama.

Izgradnjom nove hidroelektrane, iz koje se može iskoristiti količina energije W_h, i iz koje se može iskoristiti snaga P_{hKR} u razdoblju kad je potrebna najveća snaga iz termoelektrana P_t, dolazimo do prilika prikazanih na sl. 120. Potrebna najveća snaga iz termoelektrane P_t sada je manja od snage P_{to} (sl. 119). Radi izgradnje nove hidroelektrane

potrebna proizvodnja termoelektrana također se smanjuje i iznosi W'_t. Ukupni godišnji troškovi sada iznose

$$K_2 = K_{ho} + K_h + \rho\, b_t\, P_t + k'_{bs}\, W'_t \tag{214}$$

gdje su K_h godišnji troškovi nove hidroelektrane, a k'_{bs} prosječni



Sl. 119. Prikaz prilika u elektroenergetskom sistemu za slučaj da se ne gradi nova hidroelektrana. (1) potrebe energije, (2) proizvodnja energije u hidroelektranama, (3) maksimalna opterećenja, (4) iskoristiva snaga hidroelektrana.

specifični promjenljivi troškovi po kWh u termoelektranama nakon izgradnje nove hidroelektrane. Ako uzmemo u obzir, da je

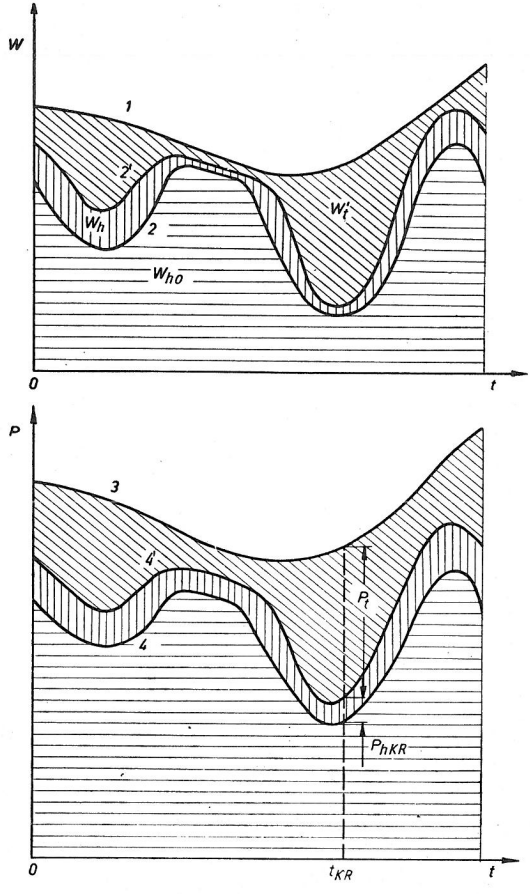
$$P_{h\,KR} = P_{to} - P_t \tag{215}$$

i da je

$$W_h = W_t - W'_t \tag{216}$$

izraz (214) možemo napisati u obliku

$$K_2 = K_{ho} + K_h + \varrho\, b_t\,(P_{to} - P_{hKR}) + k'_{bs}\,(W_t - W_h) \tag{217}$$



Sl. 120. Prikaz prilika u elektroenergetskom sistemu nakon izgradnje nove hidroelektrane. (1) potrebe energije, (2) proizvodnja u ranije izgrađenim hidroelektranama, (2′) proizvodnja u ranije izgrađenim i novoj hidroelektrani, (3) maksimalna opterećenja, (4) iskoristive snage u ranije izgrađenim hidroelektranama, (4′) iskoristive snage u ranije izgrađenim i novoj hidroelektrani.

Izraz (217) prikazuje dakle godišnje troškove u sistemu kad se pored postojećih hidroelektrana izgradi nova hidroelektrana, pa možemo smatrati da izraz (213) predstavlja godišnje troškove, ako se nova

hidroelektrana zamjeni termoelektranom potrebne snage i povećanjem proizvodnje u termoelektranama. Prema tome izrazi (213) i (217) predstavljaju godišnje troškove za dvije alternative, koje su istovrijedne s gledišta zadovoljenja potreba potrošača. Radi toga ih možemo i uspoređivati s gledišta troškova. Ako je naime

$$K_1 > K_2 \tag{218}$$

izgradnja nove hidroelektrane bit će ekonomski povoljnija od izgradnje termoelektrane. Naravno da se ovdje ne radi o usporedbi hidroelektrane s termoelektranom jednake instalirane snage, a niti o usporedbi hidroelektrane s termoelektranom iste proizvodnje. Uspoređuje se, naime, hidroelektrana s termoelektranom, koje se u energetskom smislu međusobno zamjenjuju, pri tom je obično instalirana snaga hidroelektrane veća od instalirane snage termoelektrane, dok je proizvodnja termoelektrane (budući da se radi o novoj termoelektrani, koja ima manje specifične promjenljive troškove nego u postojećim termoelektranama) obično veća od iskoristive energije hidroelektrane.

Kad je ispunjen uvjet (218) vrijedi i nejednadžba

$$K_h < b_t P_{h\,KR} + k_b W_h \tag{219}$$

gdje k_b predstavlja srednje specifične promjenljive troškove u termoelektranama, u kojima je smanjena proizvodnja radi izgradnje nove hidroelektrane. Veličina k_b određena je izrazom

$$k_b = k'_{bs} - (k'_{bs} - k_{bs}) \frac{W_t}{W_h} \tag{220}$$

do kojeg dolazimo iz relacije (213) i (217), a iz uvjeta (219).

Desna strana nejednadžbe (219) predstavlja uštedu stalnih i promjenljivih troškova u termoelektranama radi izgradnje nove hidroelektrane, pa taj izraz predstavlja i energetsku vrijednost nove hidroelektrane u usporedbi s termoelektranama. Energetsku vrijednost hidroelektrane možemo dakle prikazati izrazom

$$E_h = \varrho\, b_t P_{h\,KR} + k_b W_h \tag{221}$$

koji predstavlja apsolutnu energetsku vrijednost hidroelektrane. Apsolutna vrijednost može — s obzirom na različite veličine hidroelektrana,

pa radi toga i s obzirom na različitu visinu troškova — zavarati, pa je korisno uvesti relativnu energetsku vrijednost u odnosu na troškove K_h, koju možemo prikazati izrazom

$$e = \frac{\varrho b_t P_{hKR} + k_b W_h}{K_h} \tag{222}$$

Prema tome ako je $e > 1$, promatrana je hidroelektrana s obzirom na troškove ekonomičnija od termoelektrana, dok za slučaj kad je $e < 1$ ima više opravdanja graditi termoelektrane od promatrane hidroelektrane.

Usporedbom relativnih energetskih vrijednosti hidroelektrana, mogu se uspoređivati i hidroelektrane međusobno. Hidroelektrana s većom relativnom vrijednošću ekonomičnija je od hidroelektrane s manjom relativnom vrijednošću.

Naravno da se analiza vrijednosti hidroelektrana ne može ograničiti na hidrološke prilike u jednoj godini, kako je — samo ilustracije radi — prikazano na sl. 119 i 120, nego je potrebno provesti analizu prilika i mogućnosti hidroelektrana za niz godina pomoću krivulja vjerojatnosti (poglavlje V 2), pomoću kojih treba odrediti iskoristivu energiju iz hidroelektrana kao i iskoristivu snagu u kritičnom razdoblju. Pri tome treba uzeti u obzir i potrebnu sigurnost opskrbe potrošača (poglavlje VI).

Osim toga s vremenom se mijenjaju prilike u elektroenergetskom sistemu, a ovdje pod prilikama u sistemu razumijevamo udio hidroenergije u ukupnoj proizvodnji i karakteristike proizvodnje hidroelektrana. Zbog tih promjena mijenjat će se i iskoristiva snaga hidroelektrana u kritičnom razdoblju P_{hKR} i iskoristiva energija iz hidroelektrane W_h. Ako s P_{hKR} označimo iskoristivu snagu u n-toj godini nakon stavljanja u pogon, s W_{hn} iskoristivu energiju u istoj godini, s k_{bn} specifične promjenljive troškove, a s b_{tn} specifične stalne troškove u termoelektranama, koje zamjenjuje promatrana hidroelektrana, te ako još preračunamo troškove u n-toj godini na početak prve godine razmatranja, dobit ćemo slijedeći izraz za vrijednost hidroelektrane u n-toj godini

$$E_{hn} = \frac{\varrho\, b_{tn} P_{hKRn}}{(1+p)^n} + \frac{k_{bn} W_{hn}}{(1+p)^n} \tag{223}$$

gdje je p kamatna stopa, koja npr. za kamatnjak od 6% iznosi 0,06. Ukupna vrijednost hidroelektrana kroz n godina preračunata na početak prve godine iznosi

$$\sum_1^n E_{hn} = \varrho \sum_1^n \frac{b_{tn} P_{hKRn}}{(1+p)^n} + \sum_1^n \frac{k_{bn} W_{hn}}{(1+p)^n} \tag{224}$$

pa je relativna energetska vrijednost hidroelektrane

$$e_n = \frac{\sum_1^n E_{hn}}{\sum_1^n \frac{K_{hn}}{(1+p)^n}} \tag{225}$$

jer i sve godišnje troškove hidroelektrane moramo preračunati na početak prve godine razmatranja.

b) Vrijednost hidroelektrane s obzirom na investicije

U nekim slučajevima interesira nas energetska vrijednost hidroelektrane samo s obzirom na investicije. Na temelju sl. 119 i 120 možemo postaviti izraze za potrebne investicije za oba slučaja. To su

$$I_1 = I_{ho} + \varrho B_t P_{to} \tag{226}$$

i

$$I_2 = I_{ho} + I_h + \varrho B_t (P_{to} - P_{h\,KR}) \tag{227}$$

gdje su I_{ho} investicije za postojeće hidroelektrane, I_h investicije za novu hidroelektranu, a B_t specifične investicije po jedinici snage za termoelektrane. Istim razmatranjem kao u prethodnom odjeljku dolazimo do vrijednosti hidroelektrane, koju možemo prikazati izrazom

$$E_{hi} = \varrho B_t P_{h\,KR} \tag{228}$$

pa je relativna vrijednost s obzirom na investicije

$$e_i = \frac{\varrho B_t P_{h\,KR}}{I_h} \tag{229}$$

c) Vrijednost hidroelektrane s obzirom na zbroj investicija i pogonskih troškova

Daljnja mogućnost za uspoređivanje predstavlja zbroj investicija i pogonskih troškova u nizu od n godina, pri čemu su pogonski troškovi preračunati (uzevši u obzir kamatnu stopu p) na početak prve godine eksploatacije nove hidroelektrane. Pod pogonskim troškovima razumijevamo ovdje izdatke za plaće, gorivo, pogonski materijal, uzdržavanje, popravke i sl., dakle sve one izdatke koji nisu obuhvaćeni kamatima, otpisom i amortizacijom. U hidroelektranama su pogonski troškovi praktički proporcionalni investicijama. Faktor proporcionalnosti

označimo s α'_h uz napomenu da je α'_h znatno manji od α_h, koji je upotrebljen u (133) za određivanje ukupnih troškova u hidroelektranama. U termoelektranama pogonske troškove možemo podijeliti u dva dijela: dio proporcionalan s investicijama (faktor proporcionalnosti α'_t) i dio proporcionalan s proizvodnjom, koji se određuje na način opisan u poglavlju V 3c.

Upotrijebivši već ranije navedene oznake dobivamo za vrijednost hidroelektrane u n-toj godini s obzirom na zbroj investicija i pogonskih troškova preračunat na početak prve godine pogona, slijedeći izraz

$$E_{han} = \frac{\varrho B_{tn} (P_{hKRn} - P_{hKR1})}{(1+p)^n} + \frac{\alpha'_t \varrho B_{tn} P_{hKRn}}{(1+p)^n} + \frac{k_{bn} W_{hn}}{(1+p)^n} \tag{230}$$

gdje B_{tn} znači specifične investicije za jedinicu snage u termoelektranama u n-toj godini nakon izgradnje hidroelektrane, dok je P_{hKR1} iskoristiva snaga hidroelektrane u kritičnom razdoblju prve godine. Prvi član u izrazu (230) predstavlja utjecaj promjene iskoristive snage hidroelektrane u kritičnom razdoblju.

Ukupna vrijednost hidroelektrane kroz n godina preračunata na početak prve godine iznosi

$$\sum_1^n E_{hsn} = \varrho B_{t1} P_{hKR1} + \sum_1^n \frac{\varrho B_{tn} (P_{hKRn} - P_{hKR1})}{(1-p)^n} + \\ + \sum_1^n \frac{\alpha'_t \varrho B_{tn} P_{hKRn}}{(1+p)^n} + \sum_1^n \frac{k_{bn} W_{hn}}{(1+p)^n} \tag{231}$$

dok je relativna vrijednost hidroelektrane s obzirom na zbroj investicija i pogonskih troškova

$$e_{sn} = \frac{\sum_1^n E_{hsn}}{I_h + \sum_1^n \frac{\alpha'_h I_h}{(1+p)^n}} \tag{232}$$

d) Napomene uz određivanje vrijednosti hidroelektrane

Ne ulazi se u opravdanost upotrebe jednog između prikazanih načina određivanja vrijednosti hidroelektrana, jer je to van okvira ovih razmatranja koja tretiraju elektroenergetske podloge za određivanje vrijednosti hidroelektrana. Da bismo dakle mogli upotrijebiti izraze za određivanje vrijednosti hidroelektrana, potrebno je poznavati slijedeće elektroenergetske veličine: iskoristivu snagu promatrane

hidroelektrane u kritičnom razdoblju P_{hKR}, iskoristivu energiju iz promatrane hidroelektrane W_h, srednje specifične dodatne troškove k_b (odnosno produkt $k_b W_h$) u termoelektranama, u kojima se smanjuje proizvodnja radi izgradnje promatrane hidroelektrane, te specifične investicije B_t po jedinici snage termoelektrana. Uz zadanu veličinu B_t određeni su i specifični stalni godišnji troškovi. Veličina B_t ovisi o napretku tehnike i veličini agregata u termoelektranama, dok ostale veličine ovise o prilikama u elektroenergetskom sistemu. Način određivanja tih ostalih veličina je predmet razmatranja u slijedećim odjeljcima ovog poglavlja.

Za određivanje vrijednosti hidroelektrana potrebno je odrediti navedene veličine ne samo u momentu stavljanja u pogon nego i za niz godina nakon toga. Da bi se te veličine mogle odrediti, potrebno je poznavati s mnogo pojedinosti razvoj prilika u elektroenergetskom sistemu. Veliku poteškoću predstavlja predviđanje razvoja moguće proizvodnje hidroelektrana (uključujući u to i ostale karakteristike hidroelektrana). Radi toga se u elektroenergetskim sistemima, koji se nalaze na područjima u kojima je već u znatnoj mjeri napredovalo korištenje vodnih snaga, može pretpostaviti da se daljnjom izgradnjom neće znatnije mijenjati karakteristike proizvodnje hidroelektrana. Takvom pretpostavkom razmatranja postaju jednostavnija.

Treba međutim naglasiti da sve one veličine koje se odnose na budućnost sve manje utječu na konačni rezultat što je ta budućnost dalje, jer su sve veličine preračunate na početak prve godine razmatranja.

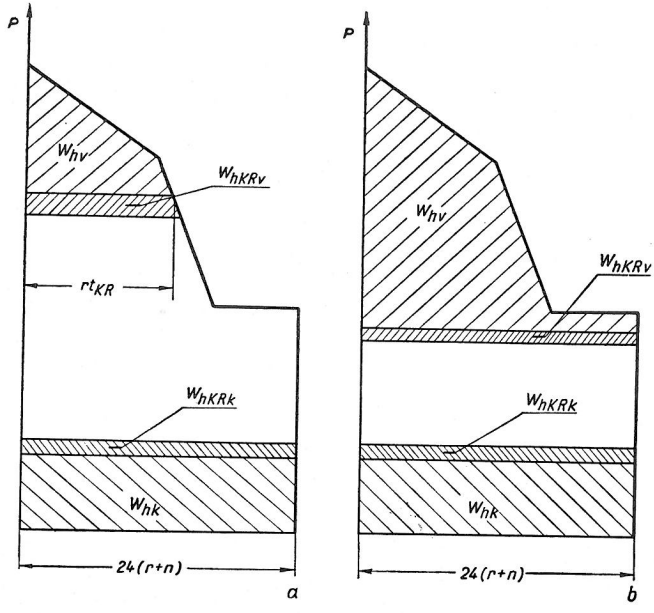
2. Određivanje iskoristive snage hidroelektrana u kritičnom razdoblju

Pođimo od krivulje trajanja opterećenja u kritičnom razdoblju (sl. 121), kad postojeće hidroelektrane imaju moguću proizvodnju varijabilne energije W_{hv} i proizvodnju konstantne energije W_{hk}. Uzevši u obzir omjer moguće proizvodnje hidroenergije i ukupnih potreba u kritičnom razdoblju, omjer potrebne varijabilne i ukupno potrebne energije, te omjer moguće proizvodnje varijabilne energije i ukupne moguće proizvodnje u hidroelektranama, moguća su u principu dva slučaja položaja hidroelektrana u krivulji trajanja opterećenja. U prvom (sl. 121a) varijabilnom energijom hidroelektrana ne mogu se pokriti sve potrebe varijabilne energije, dok u drugom slučaju (sl. 121 b) postoji i višak varijabilne energije. Ako se izgradi promatrana hidroelektrana, koja može proizvesti W_{hKRv} varijabilne energije i W_{hKRk} konstantne energije, povećat će se za te količine moguća proizvodnja varijabilne i konstantne energije, pa će to imati za posljedicu smanjenje potrebne snage iz termoelektrana. To smanjenje je jednako iskoristivoj snazi iz promatrane hidroelektrane, koju — za prvi slučaj (sl. 121 a) — možemo odrediti iz relacije

$$P_{hKR} = \frac{W_{hKRv}}{rt_{KR}} + \frac{W_{hKRk}}{24\,(r+n)} \tag{233}$$

a u drugom slučaju (sl. 121b) iz relacije

$$P_{hKR} = \frac{W_{hKRv} + W_{hKRk}}{24\,(r+n)} \tag{234}$$



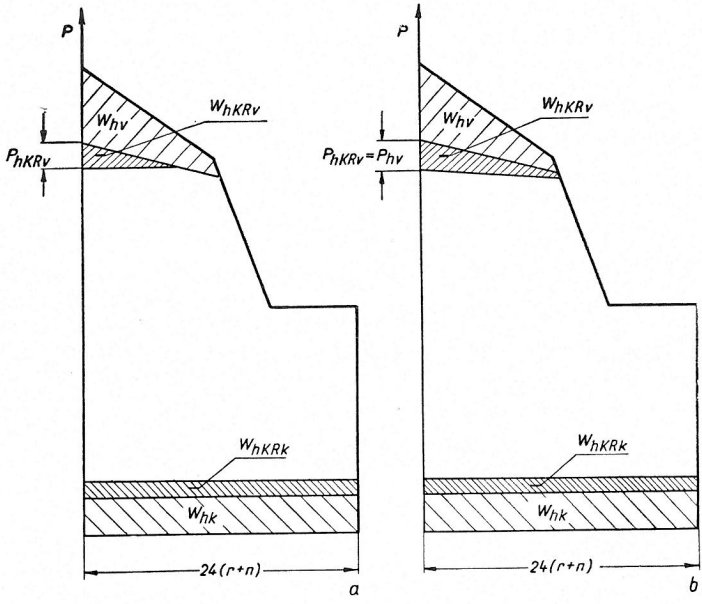
Sl. 121. Položaj nove hidroelektrane u krivulji trajanja opterećenja u kritičnom razdoblju kad dio varijabilne snage hidroelektrana ostaje neiskorišten. (*a*) slučaj male količine varijabilne energije, (*b*) slučaj velike količine varijabilne energije.

Značenje produkta rt_{KR} definirano je na sl. 121 a. U većim elektroenergetskim sistemima može se kao rt_{KR} uzeti gornja stranica trapeza, koji prikazuje energiju W_{hKRv}, jer je tada moguća proizvodnja promatrane hidroelektrane malena u usporedbi s potrebama energije.

U prvom slučaju, dakle, imamo veću snagu P_{hKR}, nego u drugom, ako u oba slučaja imamo iste vrijednosti za W_{hKRv} i W_{hKRk}. Drugi slučaj pojavit će se u elektroenergetskim sistemima, u kojima se veliki dio energije proizvodi u hidroelektranama.

Relacije (233) i (234) vrijede i za hidroelektrane s akumulacijom kao i za protočne hidroelektrane. Naravno da za protočnu hidroelektranu treba postaviti $W_{hKRv} = 0$, pa na veličinu snage P_{hKR} nema utjecaja udio hidroenergije u ukupnoj proizvodnji elektroenergetskog sistema.

Prilike prikazane na sl. 121 pojavljuju se onda kad dio varijabilne snage hidroelektrana ostaje neiskorišten, jer je u tom slučaju



Sl. 122. Položaj nove hidroelektrane u krivulji trajanja opterećenja u kritičnom razdoblju, kad je iskorištena sva varijabilna snaga hidroelektrana. a) slučaj male količine varijabilne energije u novoj hidroelektrani, b) slučaj veće količine varijabilne energije u novoj hidroelektrani.

moguće potrebnu proizvodnju termoelektrana smjestiti među dva horizontalna pravca. Neiskorištenu snagu u hidroelektranama imat ćemo (sl. 102) u kritičnom razdoblju već kod nešto većeg udjela hidroenergije u ukupnoj proizvodnji. Ako međutim nema neiskorištene varijabilne snage u hidroelektranama, pojavit će se prilike kao na sl. 122. Tada ne postoji čvrsta veza između P_{hKRv} i W_{hKRv} jer snaga P_{hKRv} ovisi ne samo o veličini W_{hKRv} nego i o ukupnoj raspoloživoj varijabilnoj snazi hidroelektrana. Snaga P_{hKRv} može se sada odrediti grafički na način prikazan na sl. 122. Za manje količine W_{hKRv} imamo prilike kao na sl. 122 a, dok za veće količine W_{hKRv} (sl. 122 b) postaje $P_{hKRv} = P_{hv}$, dakle iskoristiva snaga postaje jednaka raspo-

loživoj snazi za proizvodnju varijabilne enegije. Za prilike prikazane na sl. 122 ukupna raspoloživa snaga određena je relacijom

$$P_{hKR} = P_{hKRv} + \frac{W_{hKRk}}{24\,(r+n)} \tag{235}$$

Položaj promatrane hidroelektrane u dijagramu opterećenja u odnosu na ostale hidroelektrane nije određen ni pogonskim ni ekonomskim uvjetima, pa promatrana hidroelektrana ne treba ni da bude povlaštena ni zapostavljena prema ostalim hidroelektranama. Jedini zahtjev, koji se — u okviru analiza o kojima se ovdje radi — postavlja jeste, da se što potpunije iskoristi voda koja stoji na raspolaganju. Prema tome prilikom određivanja iskoristive snage promatrane hidroelektrane treba usporediti iskoristivu snagu hidroelektrana, koje će u razmatranom momentu biti u pogonu, bez promatrane hidroelektrane s iskoristivom snagom hidroelektrana uključujući i promatranu hidroelektranu. To vrijedi za određivanje iskoristive snage i u kasnijim godinama, a ne samo u prvoj godini pogona promatrane hidroelektrane.

3. Postupak za određivanje mogućnosti plasmana energije iz promatrane hidroelektrane

a) Određivanje plasmana hidroenergije za pojedine slučajeve

Polazeći od prilika u elektroenergetskom sistemu, u kojemu poznajemo pojavu slučajeva navedenih na sl. 70, te poznavajući moguću proizvodnju varijabilne i konstantne energije promatrane hidroelektrane, možemo za svaki slučaj odrediti mogućnost plasmana energije iz promatrane hidroelektrane. Pri tome treba uzeti u obzir istodobnost pojava.

Ako u elektroenergetskom sistemu vladaju prilike, koje odgovaraju slučajevima 1-5 (sl. 70), možemo bez detaljnije analize utvrditi, da se energija iz promatrane hidroelektrane ne može koristiti u elektroenergetskom sistemu. Prema tome energija iz promatrane hidroelektrane ne zamjenjuje proizvodnju iz termoelektrana, pa se izgradnjom promatrane hidroelektrane neće ni smanjiti proizvodnja termoelektrana. Dakle je $w_t = 0$, ako s w_t označimo smanjenje proizvodnje termoelektrana za pojedinu situaciju.

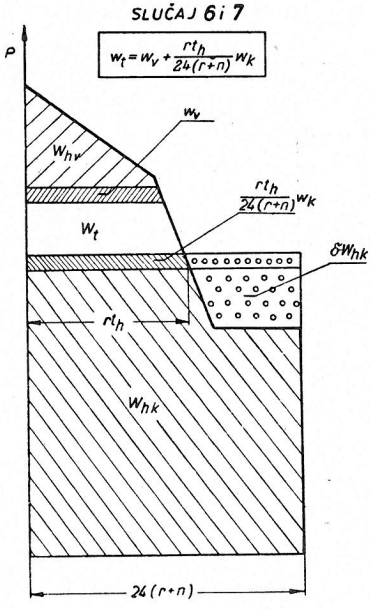
Ostale slučajeve od 6-18 treba detaljnije razmotriti.

Promotrimo najprije slučaj 6 koji je prikazan na sl. 123. Varijabilna energija w_v promatrane hidroelektrane može se sva iskoristiti mjesto energije iz termoelektrana, dok se to može ostvariti samo sa dijelom konstantne energije w_k. Mogućnost iskorištenja konstantne

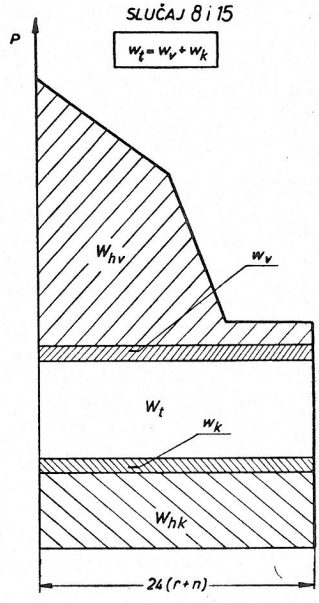
energije ovisi o raspoloživoj konstantnoj energiji u sistemu, koja se može prikazati vremenom rt_h (sl. 123) Prema tome energijom iz promatrane hidroelektrane može se zamijeniti slijedeća proizvodnja termoelektrana

$$w_t = w_v + \frac{rt_h}{24\,(r+n)}\,w_k \tag{236}$$

Za razmatranje slučaja 6, kao i svih ostalih slučajeva pretpostavljeno je, da se ne mijenjaju karakteristike pojedinih slučajeva. To je moguće



Sl. 123. Položaj nove hidroelektrane u krivulji trajanja opterećenja, kad se u sistemu pojavljuju slučajevi 6 i 7 (sl. 70).



Sl. 124. Položaj nove hidroelektrane u krivulji trajanja opterećenja, kad se u sistemu pojavljuju slučajevi 8 i 15 (sl. 70).

prihvatiti, jer se u nešto većem elektroenergetskom sistemu može računati da je moguća proizvodnja jedne hidroelektrane malena u usporedbi s ukupnom proizvodnjom hidroenergije.

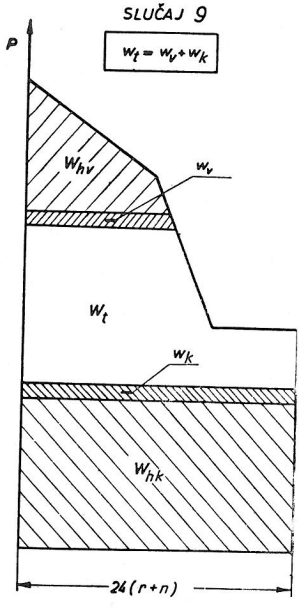
S obzirom na mogućnost iskorištenja energije iz promatrane hidroelektrane imamo iste prilike za slučaj 7 (sl. 123) i za slučaj 14 (sl. 128), jer se u oba navedena slučaja može iskoristiti sva količina varijabilne energije, a samo dio konstantne energije. Dakle i za slučajeve 7 i 14 vrijedi formula (236).

U slučaju 8 (sl. 124) međutim može se iskoristiti sva varijabilna i sva konstantna energija, pa količina energije iz termoelektrana, koja se može zamijeniti energijom iz promatrane hidroelektrane, iznosi

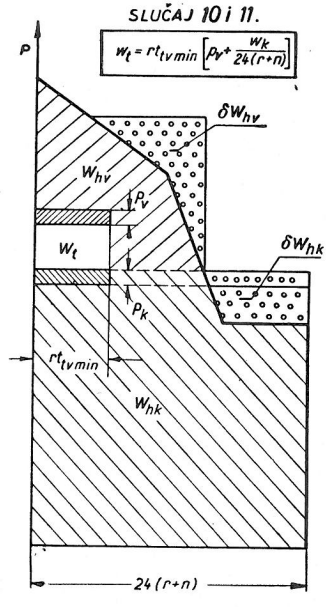
$$w_t = w_v + w_k \tag{237}$$

Iste prilike imamo u slučajevima 9 (sl. 125), 15 (sl. 124), 16 (sl. 129), te 17 i 18 (sl. 130).

Konačno imamo slučajeve 10 i 11 (sl. 126), te 12 i 13 (sl. 127), kad postoji višak energije u sistemu, ali s istodobnim manjkom snage,

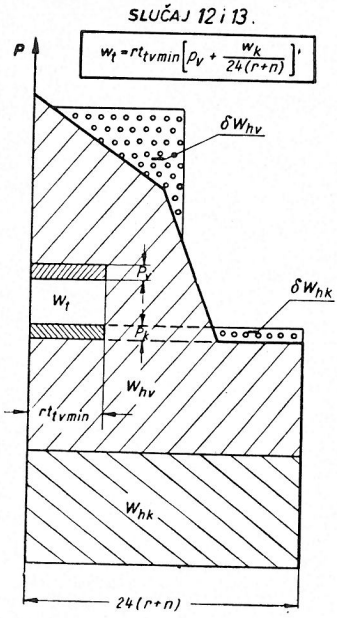


Sl. 125. Položaj nove hidroelektrane u krivulji trajanja opterećenja, kad se u sistemu pojavljuje slučaj 9 (sl. 70).

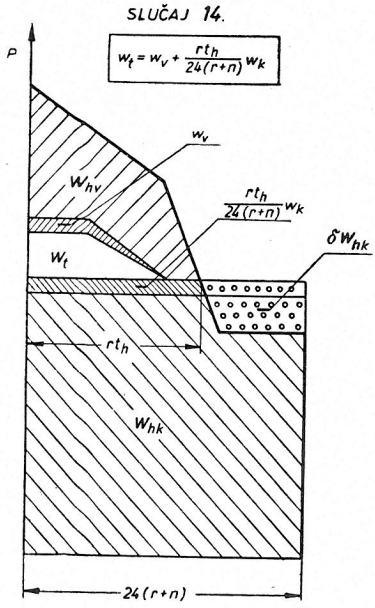


Sl. 126. Položaj nove hidroelektrane u krivulji trajanja opterećenja, kad se u sistemu pojavljuju slučajevi 10 i 11 (sl. 70).

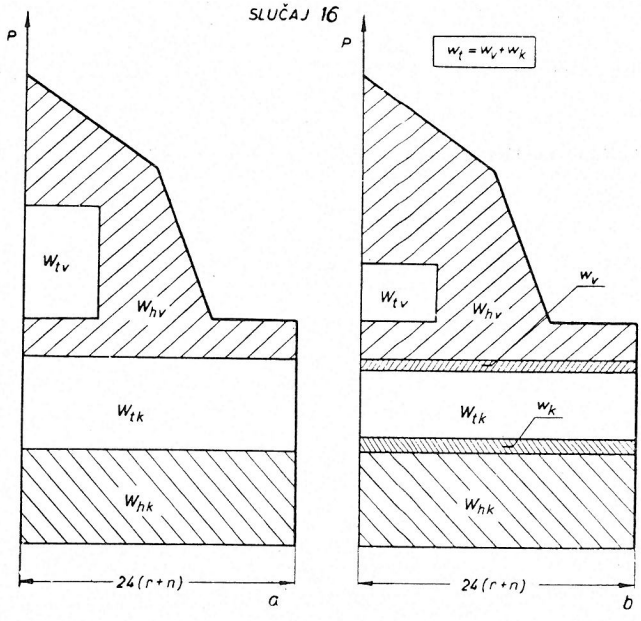
pa se novom hidroelektranom smanjuje potrebna snaga iz termoelektrana, a s tim i potrebna proizvodnja, koja je određena korištenjem te smanjene snage kroz $rt_{tv\,\min}$ (poglavlje IV 3a). Količinu energije iz termoelektrana, koja može biti zamijenjena energijom iz promatrane hidroelektrane, određujemo iz relacije



Sl. 127. Položaj nove hidroelektrane u krivulji trajanja opterećenja, kad se u sistemu pojavljuju slučajevi 12 i 13 (sl. 70).



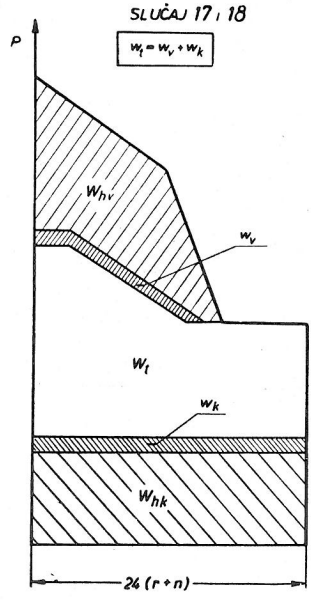
Sl. 128. Položaj nove hidroelektrane u krivulji trajanja opterećenja, kad se u sistemu pojavi slučaj 14 (sl. 70).



Sl. 129. Položaj nove hidroelektrane u krivulji trajanja opterećenja, kad se u sistemu pojavi slučaj 16 (sl. 70a). prije izgradnje nove hidroelektrane, b) nakon izgradnje nove hidroelektrane.

$$w_t = rt_{tv\min}\left[p_v + \frac{w_k}{24\,(r+n)}\right] \tag{238}$$

gdje je p_v raspoloživa varijabilna snaga promatrane hidroelektrane, dok drugi član u zagradi predstavlja raspoloživu konstantnu snagu.



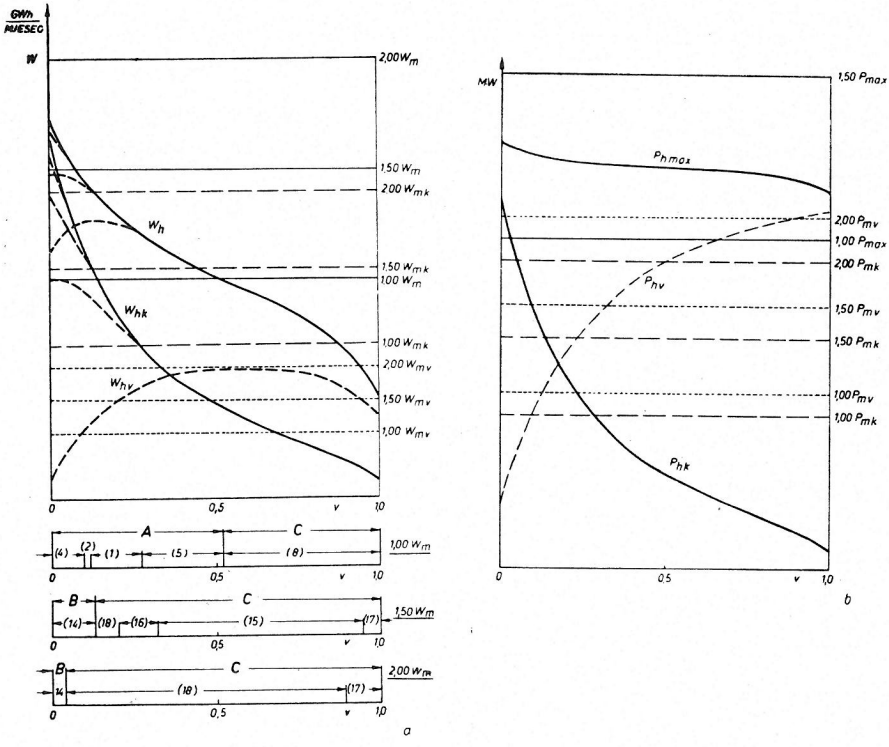
Sl. 130. Položaj nove hidroelektrane u krivulji trajanja opterećenja, kad se u sistemu pojavljuju slučajevi 17. i 18. (sl. 70).

Tab. 28. Podjela mogućih slučajeva prema sl. 70 u grupe i formule za određivanje energije iz termoelektrana, koja se zamjenjuje energijom iz novih akumulacionih i protočnih hidroelektrana.

Grupa slučajeva	Slučajevi sl. 70	Formule za određivanje energije iz termoelektrana, koja se zamjenjuje proizvodnjom iz promatrane hidroelektrane	
		Za akumulacionu hidroelektranu	Za protočnu hidroelektranu
A	1—5	$w_t = 0$	$w_t = 0$
B	6, 7 i 14	$w_t = w_v + \frac{rt_h}{24\,(r+n)} W_k$	$w_t = \frac{rt_h}{24\,(r+n)} w_k$
C	8, 9, 15—18	$w_t = w_v + w_k$	$w_t = w_k$
D	10—13	$w_t = rt_{tv\min}\left[p_v + \frac{w_k}{24\,(r+n)}\right]$	$w_t = \frac{rt_{tv\min}}{24\,(r+n)} w_k$

Prema tome svih osamnaest slučajeva iz sl. 70 možemo grupirati u četiri grupe slučajeva (tab. 28). U istoj tabeli navedene su formule za izračunavanje zamijenjene energije iz termoelektrana za hidroelektranu s akumulacijom (za koju vrijede već navedeni izrazi za w_t), kao i za protočnu hidroelektranu (za koju treba postaviti $w_v = 0$ i $p_v = 0$).

Na sl. 131 prikazan je primjer određivanja slučajeva prema sl. 70 odnosno grupe slučajeva prema tab. 28, koji se pojavljuju u jednom mjesecu za tri različita konzuma (1,00 W_m, 1,50 W_m i 2,00 W_m). Na lijevom dijagramu crtkani dijelovi krivulje za W_{hk} i W_h prikazuju proizvodnju konstantne energije i ukupnu proizvodnju hidroelektrana, koja se može iskoristiti za zadovoljenje potreba. Određivanje iskorištenja konstantne energije izvršeno je pomoću krivulje energija-snaga (poglavlje I 1d). Ispod lijevog dijagrama označene su granice unutar kojih se pojavljuju pojedini slučajevi i grupe slučajeva.

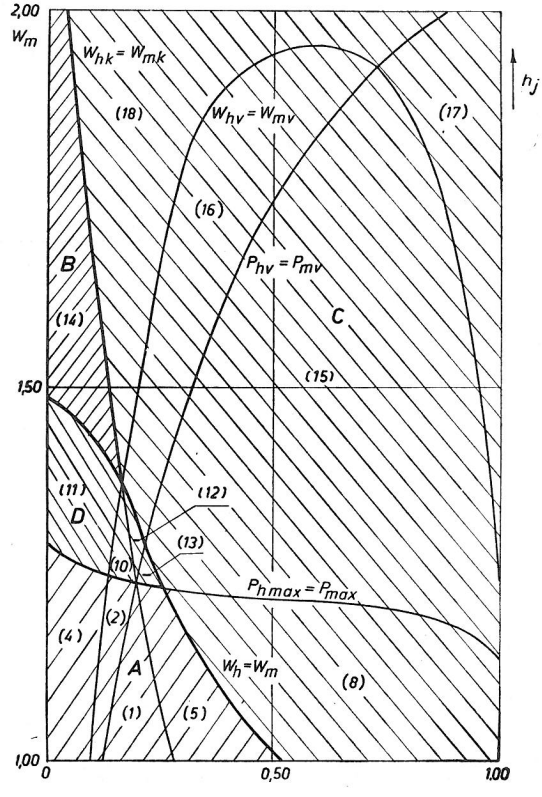


Sl. 131. Primjer određivanja slučajeva prema sl. 70 i grupa slučajeva prema tab. 28, koji se pojavljuju u jednom mjesecu za tri različita konzuma (1,00 W_m, 1,50 W_m i 2,00 W_m).

Ako promatramo povećanje potrebe od W_m do 2,00 W_m i pratimo kretanje granica među pojedinim slučajevima uz pretpostavku da se

ne mijenja moguća proizvodnja hidroelektrana, moći ćemo odrediti granice slučajeva kao funkciju potreba. Na sl. 132, prikazane su granice slučajeva za primjer na sl. 131. Krivulje koje na sl. 132 prikazuju granice među pojedinim slučajevima predstavljaju krivulje jednakih mogućnosti hidroelektrana i potreba potrošača.

Takav dijagram može poslužiti i za određivanje granica slučajeva, odnosno granica grupa slučajeva, i za prilike u budućnosti, ako pret-



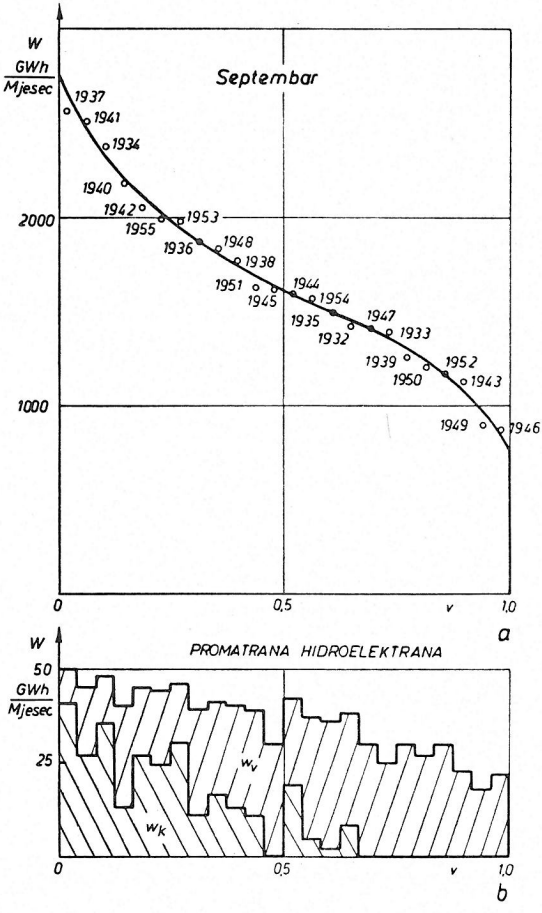
Sl. 132. Granice slučajeva prema sl. 70. i grupa slučajeva prema tab. 28. u ovisnosti o potrebama konzuma W_m odnosno o udjelu hidroenergije h_j u ukupnoj proizvodnji.

postavimo da u budućnosti neće doći do promjene proizvodnih karakteristika hidroelektrana, iako će doći do povećanja njihove proizvodnje. Uz takvu pretpostavku mjesto potreba energije W_m može se na ordinatu nanijeti udio hidroenergije (h_j) u ukupnoj godišnjoj proizvodnji.

Naravno da je moguće dijagrame kao na sl. 132 izraditi i uz pretpostavku da će u budućnosti doći do postepene promjene karakteristika hidroelektrana.

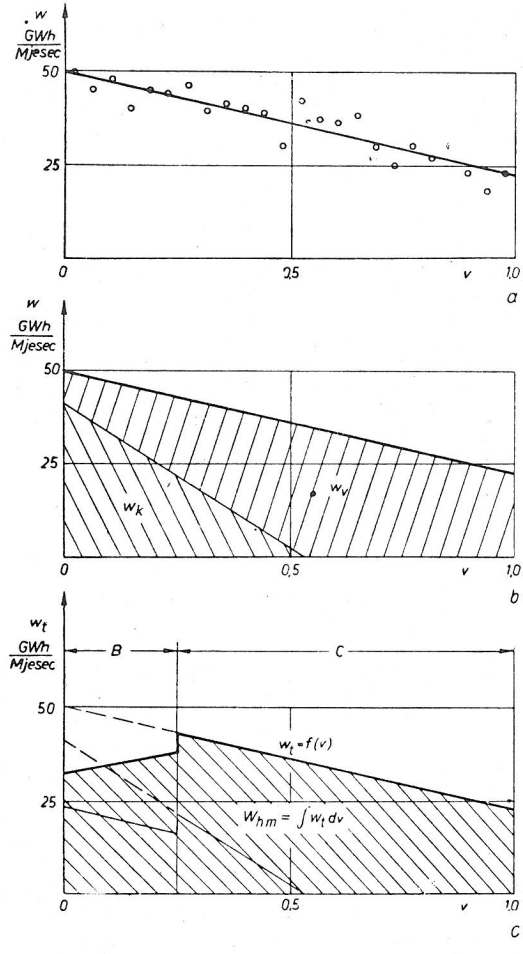
b) Određivanje plasmana energije iz promatrane hidroelektrane

Plasman energije iz promatrane hidroelektrane ovisi o mogućnosti proizvodnje u elektroenergetskom sistemu i o mogućnosti proizvodnje u samoj promatranoj hidroelektrani, uz uvjet da se promatraju mogućnosti proizvodnje, koje se istodobno pojavljuju.



Sl. 133. Krivulja vjerojatnosti moguće mjesečne proizvodnje hidroelektrana u sistemu (*a*) s naznakom redoslijeda godina prema veličini moguće proizvodnje, i moguće proizvodnje promatrane hidroelektrane (*b*) u istom mjesecu poredane po redoslijedu godina prema veličini moguće proizvodnje u hidroelektranama sistema.

Istodobnost pojave mogućih proizvodnji možemo prikazati dijagramom kao na sl. 133. U gornjem dijelu sl. 133 ucrtana je krivulja vjerojatnosti moguće mjesečne proizvodnje hidroelektrana u sistemu, kao i tačke koje prikazuju mjesečne proizvodnje u nizu godina, na temelju kojih je određena krivulja vjerojatnosti (poglavlje V 2a).



Sl. 134. Aproksimacija pravcem moguće proizvodnje promatrane hidroelektrane (*a*) za primjer na sl. 133, podjela na varijabilnu i konstantnu energiju (*b*), i energija iz promatrane hidroelektrane, kojom se zamjenjuje proizvodnja iz termoelektrana (*c*).

Uz svaku tačku označena je godina, u kojoj bi se — u promatranom mjesecu — pojavila označena proizvodnja (naravno uz razmatrano stanje izgradnje hidroelektrana). Ako sada ucrtamo moguće proiz-

vodnje promatrane hidroelektrane, a prema redoslijedu godina naznačenom u dijagramu za cijeli sistem (gornji dijagram na sl. 133), dobit ćemo dijagram moguće proizvodnje promatrane hidroelektrane, u kojemu je uzeta u obzir istodobnost pojava (donji dijagram na sl. 133). Koristeći izloženo u poglavlju II 3 odnosno II 4, možemo odrediti količinu varijabilne i konstantne energije. Pomoću tabele 28 određuje se količina energije iz termoelektrane, koju zamjenjuje promatrana hidroelektrana, odnosno energija koja se može iskoristiti iz promatrane hidroelektrane. Naravno da je pri tom potrebno poznavati granice grupa slučajeva, koje su definirane u prethodnom odjeljku.

Obrada na temelju donjeg dijagrama na sl. 133 tražila bi dosta vremena, pogotovo kad se uzme u obzir da bi trebalo odrediti mogućnosti iskorištenja energije iz promatrane hidroelektrane i u barem nekoliko godina u budućnosti da bi se dobio utjecaj daljeg razvoja sistema na iskorištenje promatrane hidroelektrane. Radi toga se može izlomljena krivulja na sl. 133 aproksimirati pravcem uz uvjet da zbroj kvadrata odstupanja bude minimalan. Takva aproksimacija za primjer na sl. 133 prikazana je na sl. 134 a. Sada možemo jednostavnije odijeliti varijabilnu od konstantne energije (sl. 134 b), pa pomoću tabele 28 odrediti i $w_t = f(v)$, koja je uz naznačene grupe slučajeva prikazana na sl. 134 c. Površina ispod krivulje $w_t = f(v)$ prikazuje termoenergiju koju zamjenjuje promatrana hidroelektrana odnosno mjesečnu iskoristivu energiju iz promatrane hidroelektrane, koja je na sl. 134 c označena s W_{hm}, jer su analizirane prilike u jednom mjesecu. Zbroj iskoristivih energija iz promatrane hidroelektrane u svih dvanaest mjeseci predstavlja veličinu koja dolazi u formulama za vrijednost hidroelektrane (poglavlje VII 1).

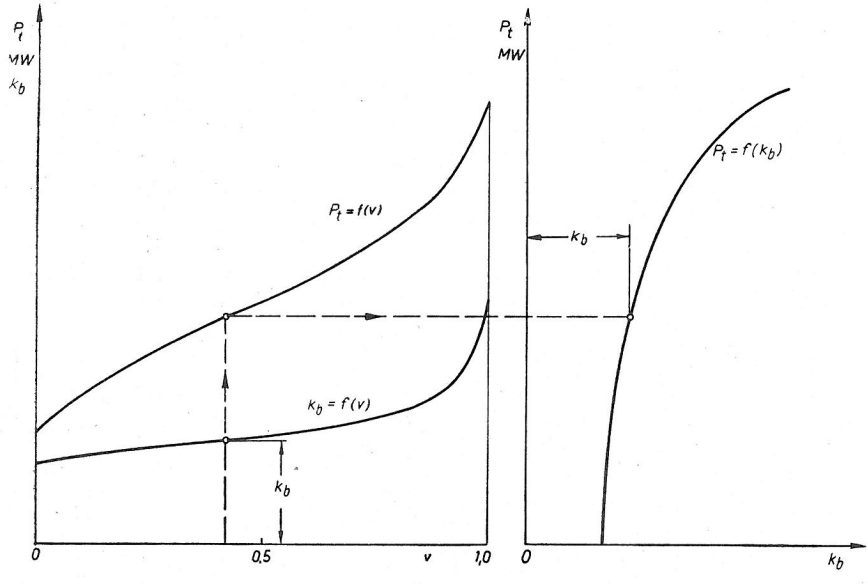
Aproksimacija pravcem (sl. 134 a) može se u ovom slučaju prihvatiti, jer je normalno proizvodnja promatrane hidroelektrane znatno manja od proizvodnje hidroenergije u sistemu.

4. Određivanje promjenljivih troškova za proizvodnju u termoelektranama koje su eliminirane zbog promatrane hidroelektrane

U formulama za određivanje vrijednosti hidroelektrana (poglavlje VII 1) dolaze promjenljivi specifični troškovi k_b za proizvodnju u termoelektrani, koja je eliminirana zbog izgradnje promatrane hidroelektrane. Ako pretpostavimo — kako je već spomenuto — da je proizvodnja promatrane hidroelektrane vrlo malena u usporedbi s proizvodnjom hidroenergije u sistemu, za određivanje veličine k_b možemo koristiti postupak prikazan na sl. 135.

Krivulja na lijevoj strani sl. 135 prikazuje sređeni dijagram dnevnih maksimalnih opterećenja termoelektrana (poglavlje V 3b), ali nacrtan

tako da malim vjerojatnostima odgovaraju mala opterećenja. Takav prikaz maksimalnih dnevnih opterećenja termoelektrana odgovara prikazu mogućnosti hidroelektrana (npr. na sl. 131). Imamo naime situaciju u sistemu, da se istodobno s velikim mogućnostima proizvodnje u hidroelektranama pojavljuje potreba malog maksimalnog opterećenja termoelektrana i obrnuto. Ako prihvatimo način određivanja krivulje vjerojatnosti za mogućnosti hidroelektrana, kako je opisan u poglavlju V 2a, moći ćemo utvrditi, da između krivulja vjerojatnosti za hidroelektrane i sređenog dijagrama dnevnih maksimalnih opterećenja termoelektrana, kako je on prikazan na sl. 135, postoji istodobnost pojava. Krivulja na lijevom dijagramu sl. 135 može dakle poslužiti kao podloga za određivanje smanjenja potrebne snage iz termoelektrana radi izgradnje promatrane hidroelektrane.



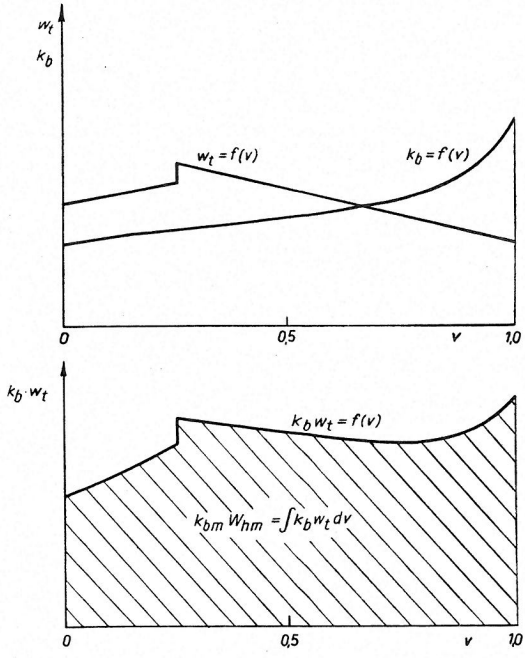
Sl. 135. Određivanje specifičnih promjenljivih troškova $k_b = f(v)$ za proizvodnju u termoelektranama, koja je smanjena radi izgradnje promatrane hidroelektrane.

U desnom dijagramu na sl. 135 imamo krivulju $P_t = f(k_b)$, čija je konstrukcija opisana u poglavlju V 3c. Konstrukcijom prikazanom na sl. 135 određujemo krivulju $k_b = f(v)$, koja daje specifične promjenljive troškove k_b za smanjenu proizvodnju termoelektrana w_t, koja se pojavljuje istodobno kad i snaga P_t, pomoću koje su određeni specifični promjenljivi troškovi k_b.

Poznavajući dakle ovisnost $w_t = f(v)$, čiji je način određivanja prikazan na sl. 134 i $k_b = f(v)$, pa množenjem tih dviju krivulja, do-

lazimo do krivulje $k_b\, w_t = f(v)$. Primjer takve krivulje prikazan je na sl. 136. Množenje je tih dviju krivulja moguće jer za istu vjerojatnost imamo i istodobnost pojava. Površina ispod krivulje $k_b\, w_t = f(v)$ predstavlja vrijednost produkta $k_{bm}\, W_{hm}$ za promatrani mjesec. Suma tih produkata za dvanaest mjeseci daje ukupno smanjenje promjenljivih troškova u termoelektranama, koje je u formulama za određivanje vrijednosti hidroelektrana označeno s $k_b\, W_h$.

Opisani način određivanja ovisnosti $k_b\, w_t$ vrijedi tačno — naravno uz već spomenutu pretpostavku da se radi o hidroelektrani



Sl. 136. Određivanje smanjenja promenljivih troškova u termoelektranama $k_{bm}\, W_{hm}$ u jednom mjesecu radi izgradnje promatrane hidroelektrane.

koja ima vrlo malenu proizvodnju u usporedbi s proizvodnjom hidroenergije u sistemu — za slučajeve 8, 10 do 13 i 15 (sl. 70). Također nema pogreške kad se pojavljuju slučajevi 1 – 5, jer je tada $w_t = 0$, pa je toliki i produkt $k_b\, w_t$. Pogreška se pojavljuje u ostalim slučajevima, jer se tada radi promatrane hidroelektrane smanjuje proizvodnja ne samo u termoelektranama s najvećim k_b nego i u termoelektranama s manjih k_b, pa su promjenljivi troškovi u termoelektranama određeni na opisani način nešto veći od stvarnih troškova. Ta razlika je tim manja što je veći udio varijabilne energije u ukupnoj proizvodnji pro-

matrane hidroelektrane, jer je varijabilna energija koncentrirana u najviši dio dijagrama opterećenja termoelektrana, pa varijabilna energija promatrane hidroelektrane zamjenjuje upravo onu proizvodnju termoelektrana koja se proizvodi s najvećim specifičnim promjenljivim troškovima.

OSMO POGLAVLJE

KORIŠTENJE SEZONSKIH AKUMULACIONIH BAZENA HIDROELEKTRANA

1. Općenito

U dosadašnjim razmatranjima (poglavlje II 3 i II 4) promatrali smo ulogu akumulacionih bazena u prilagođavanju dnevnom dijagramu opterećenja. To se može postići i s vrlo malim akumulacionim bazenima. Veći akumulacioni bazeni međutim omogućuju osim prilagođavanja dnevnom dijagramu opterećenja još i reguliranje dotoka vode turbinama unutar godine kako bi se taj dotok što bolje prilagodio potrebama potrošača. Prema izloženom u poglavlju II 1 sezonskim akumulacionim bazenom, koji omogućuje regulaciju dotoka unutar godine može se smatrati bazen, za čije je pražnjenje kroz turbine vlastite hidroelektrane potrebno 400 i više sati.

Postoji međutim znatna razlika u razmatranju akumulacionih bazena kad se njima želi postići prilagođavanje dnevnom dijagramu opterećenja i kad se želi regulirati dotjecanje vode turbinama kako bi se proizvodnja hidroelektrana što bolje prilagodila sezonskim varijacijama potrošnje električne energije. U prvom slučaju naime za određivanje načina korištenja akumulacionog bazena potrebno je poznavati dijagram opterećenja i dotok vode najviše za nekoliko dana unaprijed, što je moguće predvidjeti s većom sigurnošću. Nasuprot tome za određivanje sezonskog korištenja akumulacionog bazena potrebno je predvidjeti potrebe energije i dotok hidroelektranama nekoliko mjeseci pa i cijelu godinu unaprijed. O tom predviđanju, koje je vrlo nesigurno, ovisi raspored punjenja i pražnjenja akumulacionog bazena.

Pitanje rasporeda punjenja i pražnjenja akumulacionih bazena od važnosti je kako prilikom projektiranja hidroelektrane tako i prilikom eksploatacije izgrađene hidroelektrane sa sezonskim akumulacionim bazenom. Radi pravilne ocjene energetske vrijednosti promatrane hidroelektrane, o kojoj često puta ovisi i odluka o gradnji, neophodno je potrebno da način korištenja akumulacije, na osnovu kojega se određuje i moguća proizvodnja i uloga hidroelektrane u elektroenergetskom sistemu, bude što sličnija načinu korištenja akumulacije, koji će biti ostvaren za vrijeme pogona hidroelektrane. Samo u takvom slučaju će se moći u projektu prikazati prava vrijednost hidroelektrane.

Ne treba međutim gubiti iz vida da se prilikom projektiranja sve analize provode na osnovu hidroloških podataka iz prošlosti, pa se sve situacije koje mogu nastupiti u analiziranom razdoblju znaju unaprijed. Nasuprot tome za vrijeme eksploatacije možemo hidrološke prilike predviđati s izvjesnom sigurnošću samo za kraće vrijeme unaprijed.

2. Neki kriteriji za korištenje akumulacionih bazena hidroelektrana

Moguće je postaviti nekoliko kriterija za korištenje sezonskih akumulacionih bazena i to:

a) izravnanje protoka ili proizvodnje u akumulacionoj hidroelektrani, kako bi se u promatranoj akumulacionoj hidroelektrani moguća proizvodnja energije raspodijelila što moguće ravnomjernije na cijelu godinu ili sezonu,

b) kriterij štednje goriva u termoelektranama, kako bi se što bolje iskoristila voda koja dotječe hidroelektranama,

c) kriterij sigurnosti opskrbe potrošača s namjerom da se što bolje osigura proizvodnja električne energije u razdobljima s malim dotocima,

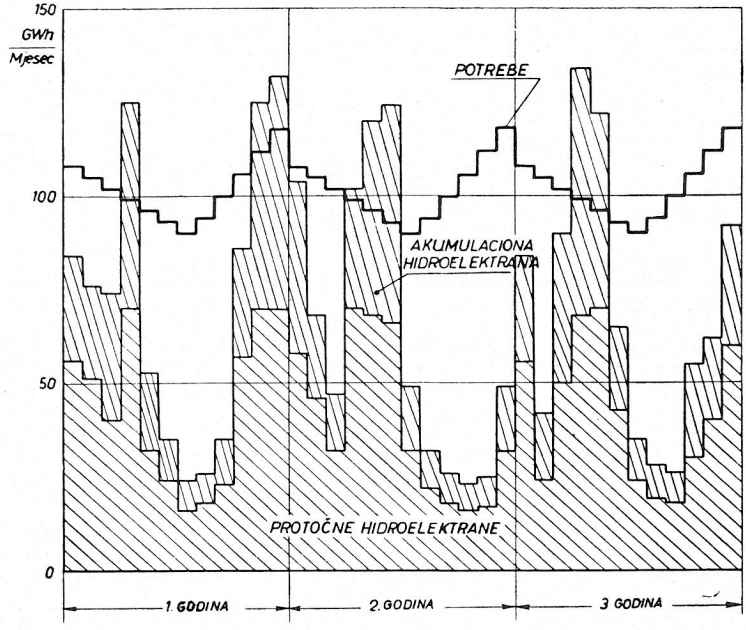
d) kriterij izravnanja proizvodnje u termoelektranama s namjerom da se potrebna energija iz termoelektrana tokom godine proizvede pomoću što manje snage.

Usporedimo na osnovu znatno pojednostavljenog primjera navedene kriterije korištenja akumulacionih bazena. Na sl. 137 prikazane su moguće proizvodnje protočnih hidroelektrana u tri godine, kao i energija koju bi bilo moguće proizvesti vodom koja dotječe u akumulacioni bazen akumulacione hidroelektrane. Prilikom određivanja energije, koja bi se mogla proizvesti dotokom u akumulaciju, nije uzimano u obzir ograničenje radi veličine izgradnje akumulacione hidroelektrane, jer će se dotok moći regulirati pomoću akumulacionog bazena. Na sl. 137 prikazane su također potrebe energije.

[a) Kriterij izravnanja proizvodnje u akumulacionim hidroelektranama

Da se odredi mogućnost izravnanja protoka pomoći akumulacionog bazena, obično polazimo od sumarne krivulje protoka [28, 29] koja prikazuje ukupnu količinu vode, koja je protekla kroz promatrani profil od momenta početka promatranja. Za energetska razmatranja zgodnije je međutim poći od sumarne krivulje mogućnosti proizvodnje, koja — analogno sumarnoj krivulji protoka — prikazuje ukupnu moguću proizvodnju od početka razmatranja. Na sl. 138 a

prikazana je sumarna krivulja proizvodnje akumulacione hidroelektrane za koju su podaci navedeni na sl. 137. Takav način prikazivanja vrlo je nepogodan, jer je potrebno odabrati takvo mjerilo da bi se sumarna krivulja mogla nacrtati na povoljnom formatu papira, a to dovodi do nemogućnosti uočavanja ikakovih razlika na njoj pogotovo kad se radi o duljem nizu godina. Zbog toga se obično sumarna krivulja



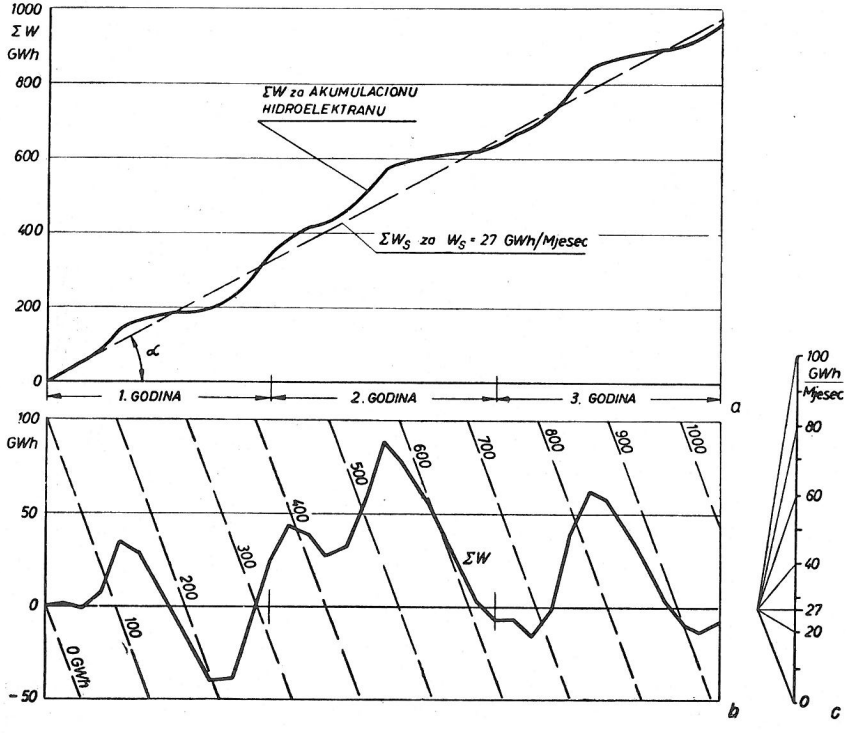
Sl. 137. Podaci o potrebama i proizvodnjama hidroelektrana kroz tri godine. Osnova za primjer za usporedbu kriterija o načinu korištenja akumulacije.

prikazuje u kosokutnom koordinatnom sistemu (sl. 137 b). Kut zakretanja α odabire se obično tako da pravac koji čini taj kut s osi apscisa predstavlja sumarnu krivulju proizvodnje, koja je stalno približno jednaka prosječnoj proizvodnji u promatranom razdoblju.

Nagibom sumarne krivulje bilo u pravokutnom bilo u kosokutom koordinatnom sistemu definirana je mjesečna količina energije. Iz nagiba, a pomoću pramena pravca na sl. 138 c, određujemo mjesečne proizvodnje.

Poznavajući energetsku vrijednost akumulacije (W_a) možemo nacrtati pored osnovne sumarne krivulje proizvodnje i pomoćnu sumarnu krivulju, koja je prema osnovnoj pomaknuta za energetsku vrijednost akumulacije. Na sl. 139 prikazana je pomoćna sumarna

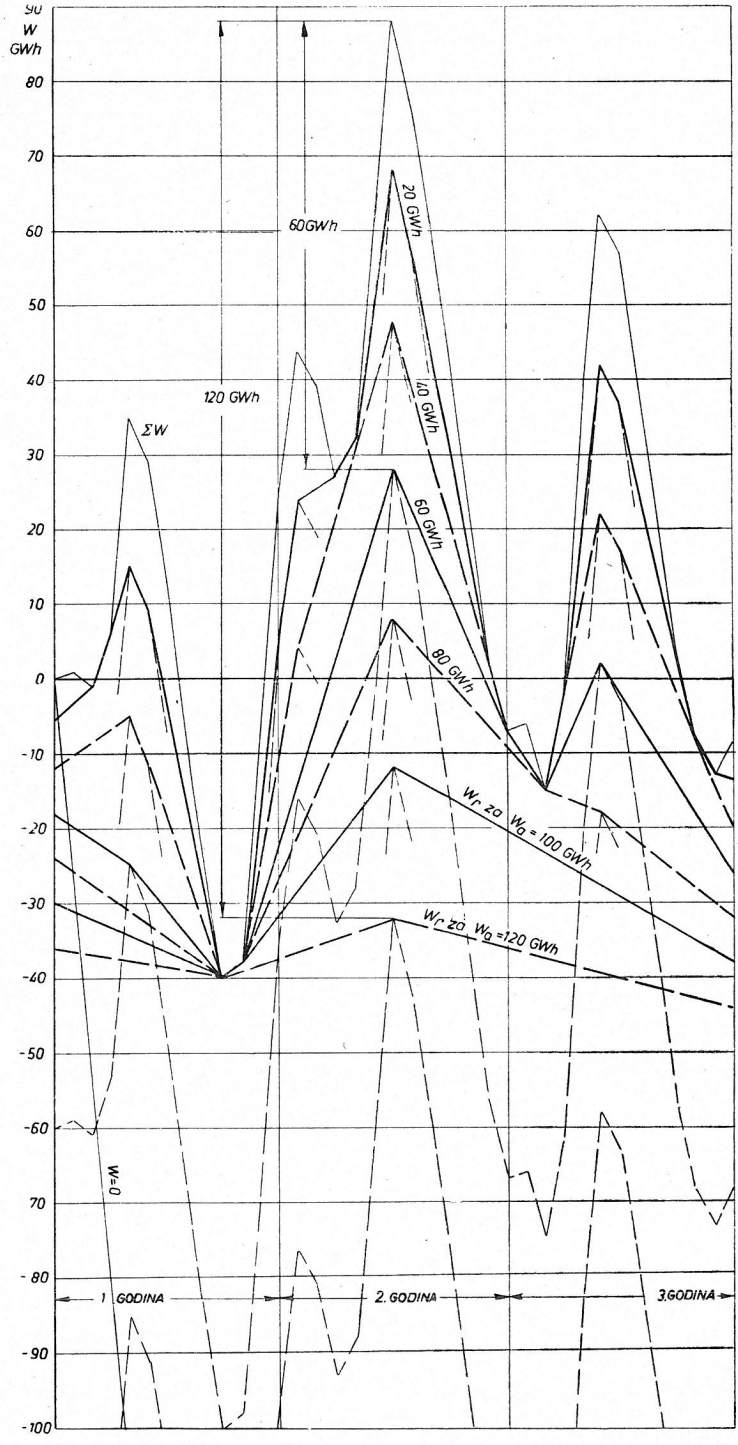
krivulja za $W_a = 60$ i $W_a = 120$ GWh, dok su za ostale energetske vrijednosti akumulacije pomoćne sumarne krivulje samo djelomično nacrtane. Povlačenjem pravaca ili krivulja, koje se nalaze između osnovne i pomoćne krivulje, određena je regulirana proizvodnja promatrane hidroelektrane, koja se može ostvariti dotokom u akumulaciju i korištenjem akumulacije. Kad pravac ili krivulja regulirane proizvodnje



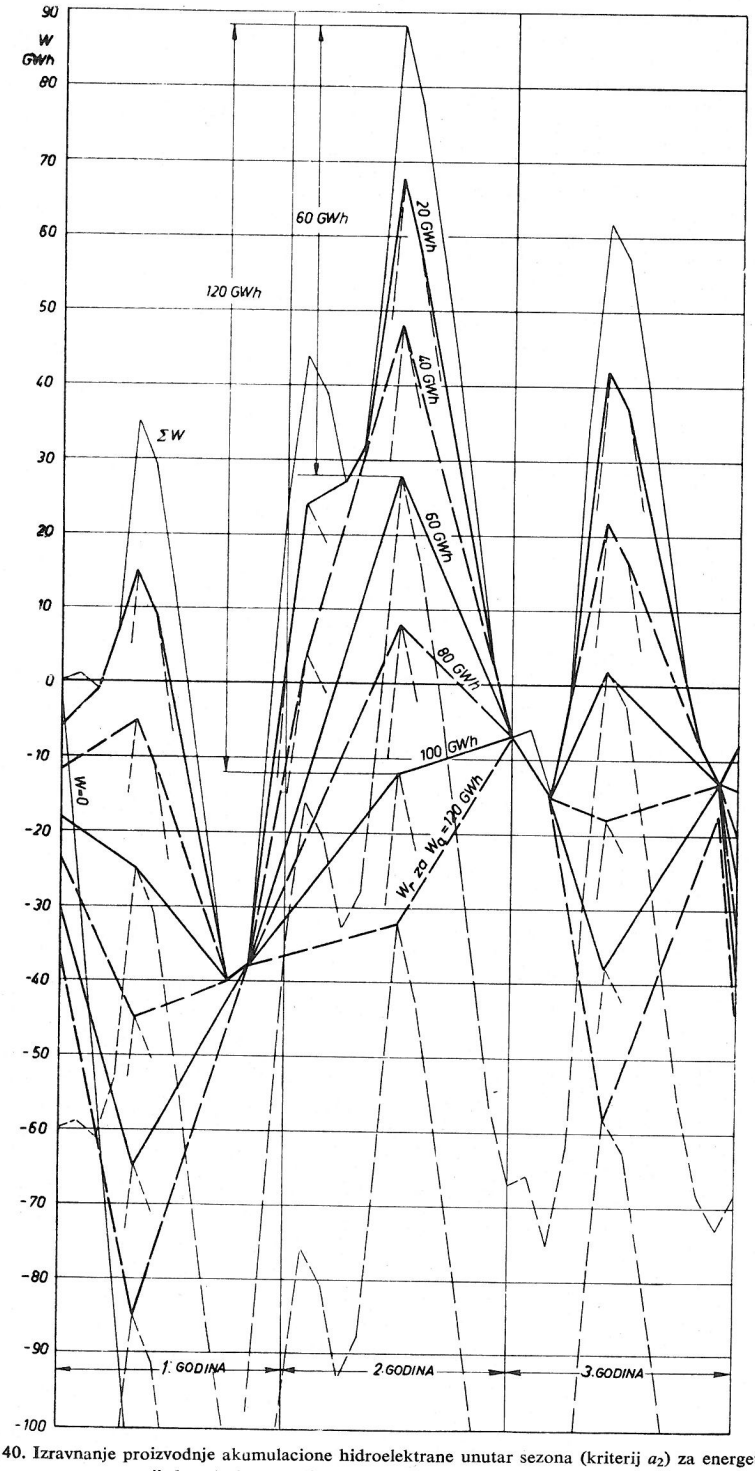
Sl. 138. Sumarna krivulja proizvodnja akumulacione hidroelektrane uz prirodni raspored dotoka: (*a*) u pravokutnom, (*b*) u kosokutnom koordinatnom sistemu, (*c*) pramen pravaca za određivanje mjesečne proizvodnje iz sumarne krivulje.

dodirne osnovnu sumarnu krivulju znači da je akumulacioni bazen pun, dok dodir s pomoćnom sumarnom krivuljom označuje ispražnjenje akumulacionog bazena. Kad se radi o izravnanju proizvodnje, regulirana proizvodnja je prikazana izlomljenim pravcima (sl. 139 i 140). Način povlačenja pravaca između osnovne i pomoćne sumarne hrivulje ovisi o prihvaćenom načinu izravnanja proizvodnje.

Može se postaviti zahtjev, da se predvidi takvo korištenje akumulacije, kako bi se postigla što jednoličnija proizvodnja energije ili — kako se to obično naziva — što bolje izravnanje proizvodnje



Sl. 139. Što bolje izravnanje proizvodnje akumulacione hidroelektrane (kriterij a_1) za energetske vrijednosti akumulacije od $W_a = 20$ do $W_a = 120$ GWh.



Sl. 140. Izravnanje proizvodnje akumulacione hidroelektrane unutar sezona (kriterij a_2) za energetske vrijednosti akumulacije od $W_a = 20$ do $W_a = 120$ GWh.

(kriterij a_1). To izravnanje može se protegnuti na sezonu, na godinu, pa i na više godina. To ovisi o rasporedu protoka i o veličini akumulacionog bazena. Takav način korištenja akumulacije za akumulacionu hidroelektranu, čija je neregulirana proizvodnja prikazana na sl. 137, ucrtan je izlomljenim pravcima W_r na sl. 139 među sumarnim krivuljama. Pri određivanju tih pravaca uzeto je u obzir da je u početku prve i na kraju treće godine razmatranja u akumulacionom bazenu akumulirano toliko vode, da ona predstavlja 30% od energetske vrijednosti akumulacije.

Daljnja mogućnost je, da se godina podijeli na dva dijela: vlažni i sušni period. Sada se može odrediti korištenje akumulacije uz zahtjev, da na kraju vlažnog perioda akumulacioni bazen bude napunjen, te da se akumulirana voda utroši u sušnom periodu s tim da prije početka vlažnog perioda akumulacija bude prazna. Taj kriterij (a_2) može se modificirati tako da se utvrdi da mjesečna proizvodnja u razdoblju punjenja akumulacionog bazena ne bude ispod određene vrijednosti ili da se propiše da krajem sušnog perioda treba da bude u akumulacionom bazenu određeni postotak od moguće akumulirane energije. Na sl. 140 prikazano je korištenje akumulacije prema kriteriju a_2, ali bez spomenutih modifikacija. I sada je, kao i za kriterij prikazan na sl. 139, uzeto u obzir stanje u akumulaciji na početku i na kraju razmatranog razdoblja.

U oba slučaja određena je mogućnost izravnanja proizvodnje za nekoliko energetskih vrijednosti akumulacija. Za relativno male energetske vrijednosti akumulacija u oba slučaja dobivamo isto izravnanje proizvodnje.

b) Kriterij štednje goriva u termoelektranama

Da bi se uštedilo gorivo u termoelektranama, potrebno je ostvariti što veću proizvodnju u hidroelektranama, a to je moguće postići ako se preljevi vode svedu na što manju mjeru. To se najsigurnije može ostvariti, ako se akumulacioni bazen drži čim više prazan, kako bi bio sposoban da primi što veće količine viškova vode koji se mogu pojaviti. To drugim riječima znači, da akumulacioni bazen treba puniti samo onda kad se pojave viškovi, koji se ne mogu iskoristiti, te da ga treba isprazniti čim bude moguće iskoristiti akumuliranu vodu, kako bi bio čim prije spreman da primi viškove koji se mogu pojaviti. Korištenje akumulacije kad je konsekventno proveden spomenuti princip nazivamo kriterij b_1.

Takav način korištenja akumulacije normalno dovodi do pojave da postojanje akumulacije nema nikakvog utjecaja na prilike u kritičnom razdoblju, jer je potrebna proizvodnja energije i potrebna snaga iz termoelektrana ostala nepromijenjena bez obzira na postojanje akumulacije. Zbog toga se gore izneseni kriterij može modificirati tako da se primijeni samo na vlažno razdoblje godine, dok se u sušnom razdoblju akumulirana voda čuva za povećanje proizvodnje u naj-

sušnijim mjesecima, kad se koristi uz zahtjev da se izravna proizvodnja u termoelektranama (kriterij b_2). Na taj način se znatno smanjuje potrebna proizvodnja i potrebna snaga termoelektrana u kritičnom razdoblju.

c) Kriterij sigurnosti opskrbe potrošača

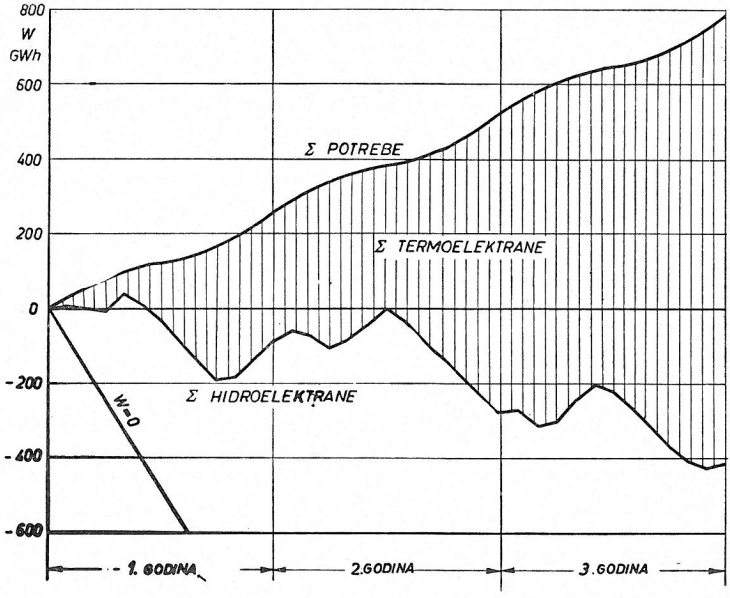
Ovaj kriterij predstavlja drugu krajnost u usporedbi s kriterijem štednje goriva. Da bi se naime do maksimuma osigurala opskrba potrošača električnom energijom, najpovoljnije je što dulje održavati akumulacioni bazen pun, a prazniti ga tek onda kad su svi ostali energetski izvori već potpuno angažirani, pa bi bez pražnjenja akumulacije bilo nužno smanjiti dobavu električne energije potrošačima. Dakle, da se ostvari što veća sigurnost opskrbe potrošača, treba nastojati čim prije napuniti akumulacioni bazen, pa barem i uz angažiranje pune raspoložive snage termoelektrana i uz preljeve vode do kojih kasnije može doći radi forsiranog punjenja akumulacionog bazena. Takav način dovodi do najmanje moguće potrebne proizvodnje i potrebne snage u kritičnom razdoblju, ali i do relativno vrlo velikih preljeva vode u akumulacionoj hidroelektrani.

d) Kriterij izravnanja proizvodnje termoelektrana

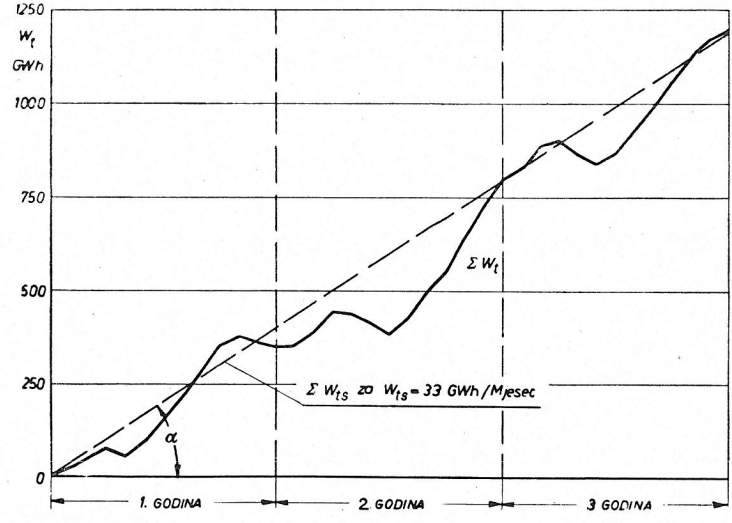
Kako je već uvodno spomenuto, kad bi se ostvario takav način korištenja akumulacija da bi termoelektrane svaki dan proizvodile istu količinu energije, bilo bi moguće ostvariti potrebnu proizvodnju termoelektrana uz najmanju moguću potrebnu snagu termoelektrana, jer bi se tada postiglo najveće moguće iskorištenje snage termoelektrana. Međutim mogućnost izravnanja proizvodnje termoelektrana ovisi s jedne strane o varijaciji potreba energije, a s druge strane o rasporedu proizvodnje hidroelektrana i o mogućnosti akumuliranja vode.

Budući da se radi o izravnanju proizvodnje i sada se možemo poslužiti sumarnom krivuljom, ali sada sumarnom krivuljom potrebne proizvodnje termoelektrana. Nju određujemo kao razliku između sumarne krivulje potrebne energije i sumarne krivulje moguće proizvodnje hidroelektrana (sl. 141). Pod mogućom proizvodnjom hidroelektrana razumijevamo moguću proizvodnju protočnih hidroelektrana uzevši u obzir ograničenje moguće proizvodnje veličinom izgradnje hidroelektrana, te moguću proizvodnju akumulacionih hidroelektrana prema rasporedu dotoka u akumulaciju i bez ograničenja moguće proizvodnje radi veličine izgradnje hidroelektrane, koja koristi akumulaciju.

Uzevši u obzir razlike između sumarnih krivulja potreba i proizvodnja hidroelektrana (sl. 141), možemo nacrtati sumarnu krivulju potrebne proizvodnje termoelektrana (sl. 142). Za razliku od sumarne krivulje proizvodnje hidroelektrana, kod koje ordinate ne mogu postati



Sl. 141. Sumarna krivulja potreba i sumarna krivulja proizvodnje hidroelektrana za prilike prikazane na sl. 137.



Sl. 142. Sumarna krivulja potrebne proizvodnje termoelektrana određena kao razlika sumarnih krivulja na sl. 141.

manje, kod sumarne krivulje potrebne proizvodnje termoelektrana može se pojaviti i smanjivanje ordinata. To se pojavljuje kad je ukupna proizvodnja hidroelektrana veća od potreba, pa u tom slučaju računamo da je potrebna proizvodnja termoelektrana negativna. To je potrebno učiniti, da bi se uzela u obzir i ona količina vode, koja dotječe u akumulaciju, a koja se može iskoristiti baš radi postojanja akumulacionog bazena.

Prelazom na kosokutni koordinatni sistem, kao kod razmatranja izravnanja proizvodnje hidroelektrana (sl. 138 b), dolazimo do sumarne krivulje potrebne proizvodnje termoelektrana u mjerilu pogodnom za daljnju upotrebu (sl. 143). Da bi se održalo ranije značenje osnovne i pomoćne sumarne krivulje, kao i međusobni položaj tih dviju krivulja, izmijenjen je predznak razlike između sumarne krivulje W_t i pravca ΣW_{ts} (sl. 142). S izmjenom predznaka dolazimo do iste osnove za određivanje proizvodnje termoelektrana, kojom se regulira proizvodnja akumulacione hidroelektrane, kao i za određivanje izravnanja proizvodnje hidroelektrana (sl. 139 i 140). Potrebno je i sada pored osnovne sumarne krivulje nacrtati pomoćnu sumarnu krivulju potrebne proizvodnje termoelektrana pomaknutu prema dolje za energetsku vrijednost akumulacije. Pravci koji se nalaze između tih dviju sumarnih krivulja prikazuju potrebnu reguliranu proizvodnju termoelektrana za zadovoljenje potreba, ali uz uvjet da je proizvodnja akumulacione hidroelektrane u okviru mogućnosti akumulacionog bazena. Dodir pravca, koji prikazuje potrebnu reguliranu proizvodnju termoelektrana, s osnovnom odnosno s pomoćnom sumarnom krivuljom znači da je akumulacioni bazen napunjen odnosno ispražnjen.

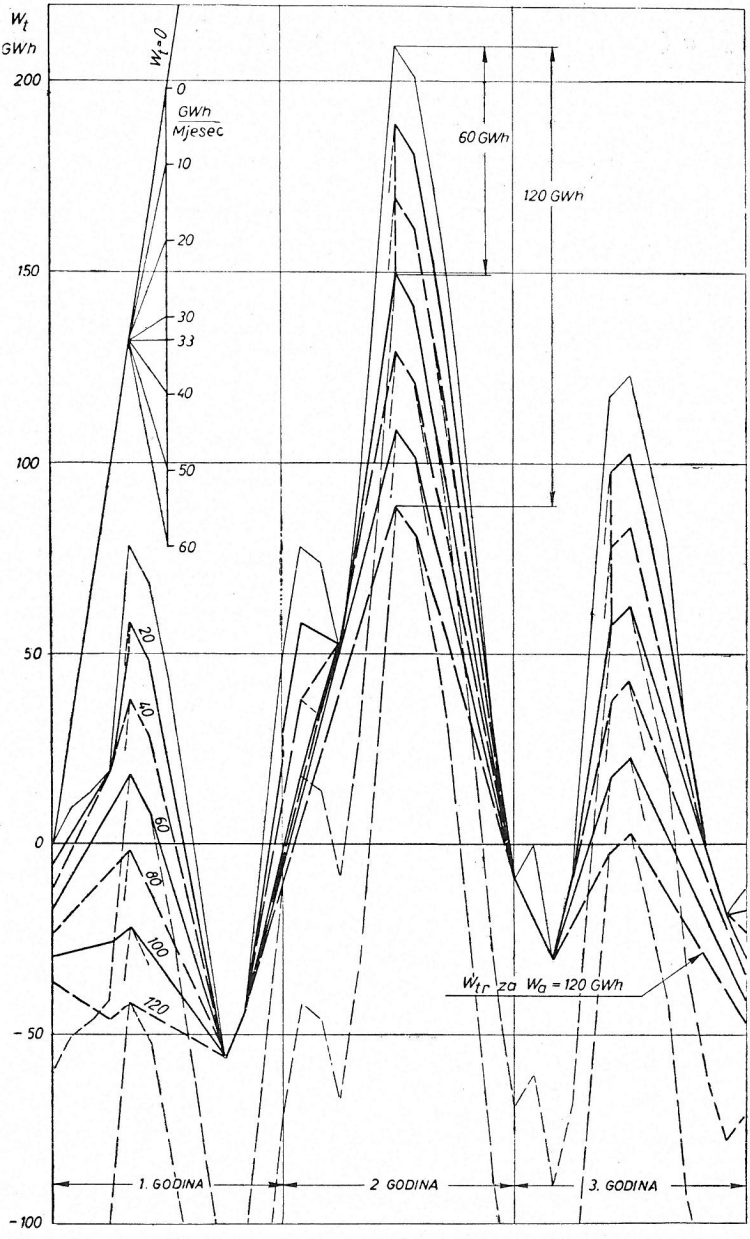
Na sl. 143 prikazano je izravnanje proizvodnje termoelektrana za različite energetske vrijednosti akumulacije, a za sumarnu krivulju koja je prikazana na sl. 141 i 142. Treba naglasiti, da prilikom povlačenja pravaca, koji prikazuju proizvodnju termoelektrana, treba voditi računa o činjenici, da se u akumulaciju može spremiti samo ona količina vode koja dotječe u akumulacioni bazen. Zbog toga i imamo lomove na početku 1. godine (sl. 143) za vrijednosti akumulacije 100 i 120 GWh.

e) Usporedba kriterija

Način korištenja akumulacija nema utjecaja na troškove u hidroelektranama, pa za usporedbu kriterija treba razmotriti utjecaj načina korištenja akumulacionih bazena na potrebu izgradnje termoelektrana i na potrebnu proizvodnju u termoelektranama.

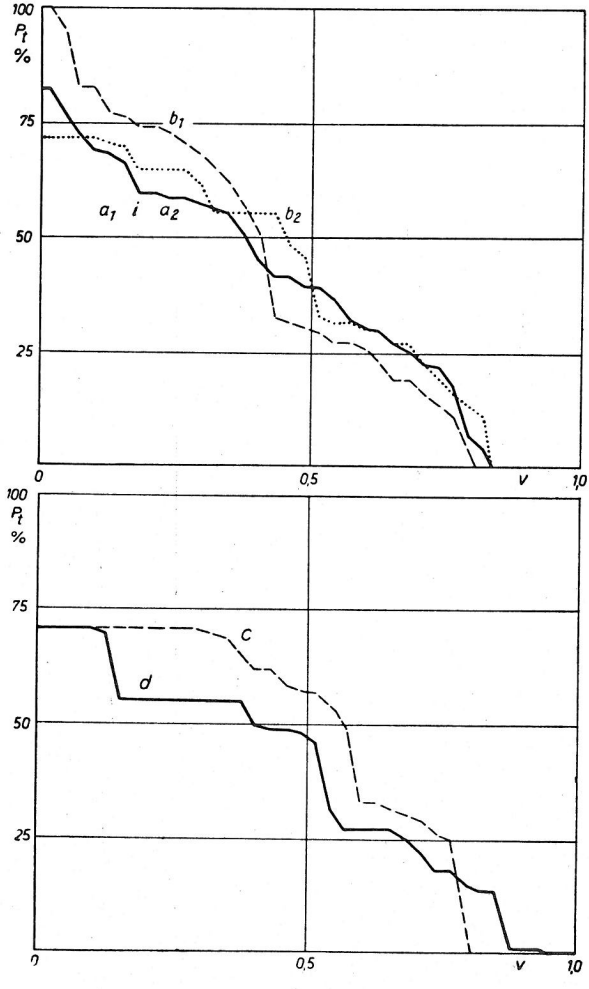
U prethodnim odjeljcima određena je proizvodnja akumulacione hidroelektrane za promatrane kriterije korištenja akumulacionog bazena. Tim su određene mogućnosti proizvodnje hidroelektrana, pa je pomoću metode konstantne i varijabilne energije (poglavlje IV 3) moguće odrediti potrebne snage i proizvodnje termoelektrana, a odatle (poglavlje V 3a) i krivulje trajanja njihovih opterećenja.

Te krivulje prikazane su za $W_a = 60$ GWh na sl. 144, a na sl. 145 za energetsku vrijednost akumulacije $W_a = 120$ GWh. Kako se vidi



Sl. 143. Izravnanje proizvodnje termoelektrana (kriterij *d*) za energetske vrijednosti akumulacija od $W_a = 20$ do $W_a = 120$ GWh.

postoji znatna razlika između krivulja trajanja opterećenja termoelektrana za pojedine kriterije. Najveća raspoloživa snaga iz termoelektrana potrebna je za kriterij b_1 (konsekventno proveden kriterij štednje ugljena), dok je najmanja snaga termoelektrana potrebna za kriterije c (sigurnost opskrbe potrošača) i d (izravnanje proizvodnje

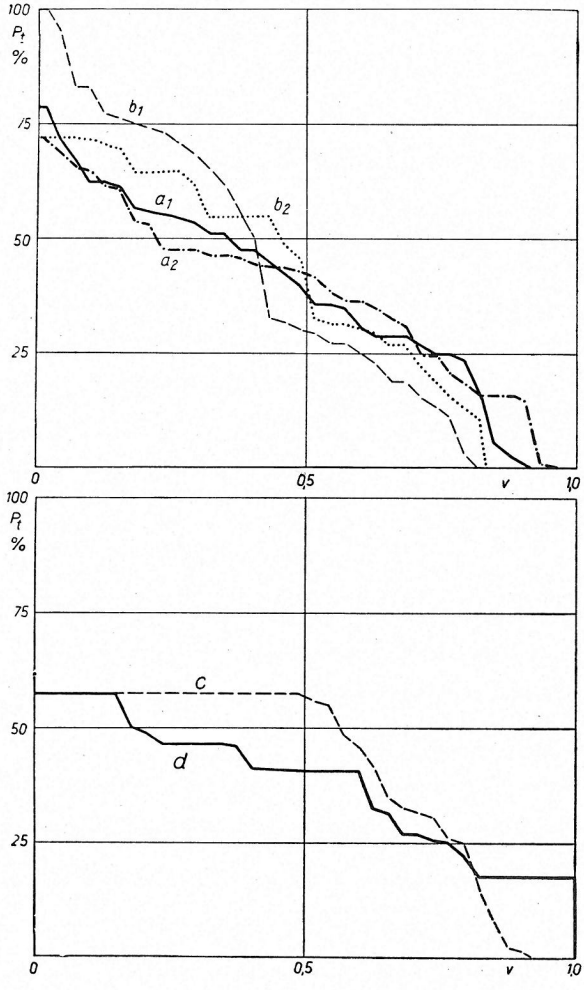


Sl. 144. Krivulje trajanja opterećenja termoelektrana za promatrane kriterije korištenja akumulacije, a za energetsku vrijednost akumulacije W_a = 60 GWh.

termoelektrana). Za male energetske vrijednosti akumulacije — po potrebnoj maksimalnoj snazi termoelektrana — izjednačuje se s kriterijima c i d još i kriterij b_2 (štednja ugljena u vlažnim razdobljima, ali čuvanje akumulirane vode u sušnom razdoblju godine).

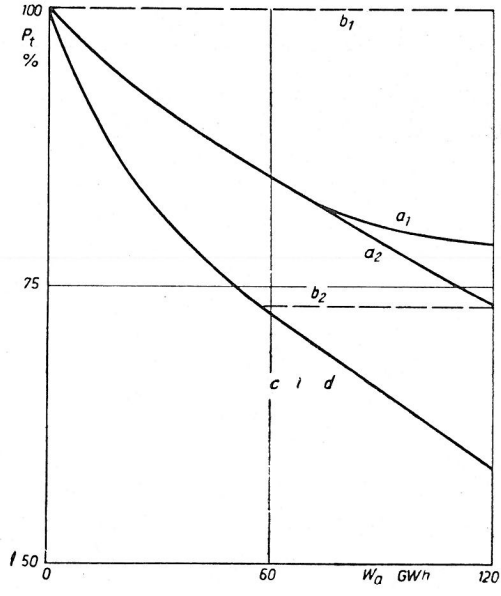
Na sl. 146 prikazane su potrebne maksimalne raspoložive snage termoelektrana za zadovoljenje potreba u ovisnosti o energetskoj vrijednosti akumulacije.

Uspoređujući krivulje trajanja opterećenja termoelektrana za kriterije *c* i *d* (donji dijagrami na sl. 144 i 145), opazit ćemo da su

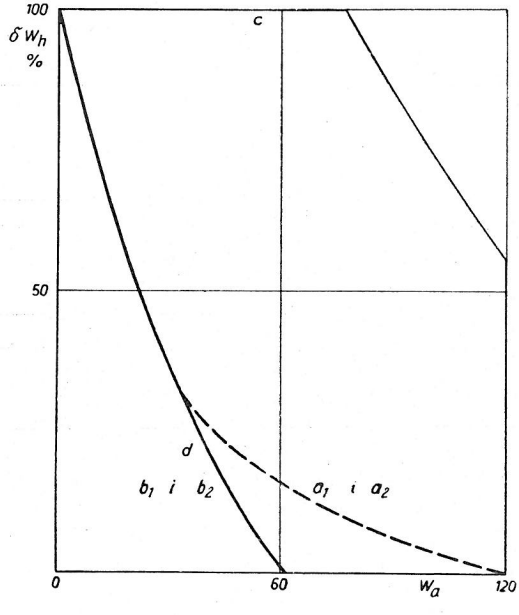


Sl. 145. Krivulje trajanja opterećenja termoelektrana za promatrane kriterije korištenja akumulacije, a za energetsku vrijednost akumulacije $W_a = 120$ GWh.

površine ispod krivulja za kriterij *c* veće od površina za kriterij *d*, što znači da se kod kriterija *c* pojavljuju veći preljevi u hidroelektranama. Osim toga, kad bismo odredili — na način opisan u poglavlju V 3c — ukupne promjenljive troškove u termoelektranama, konstatirali



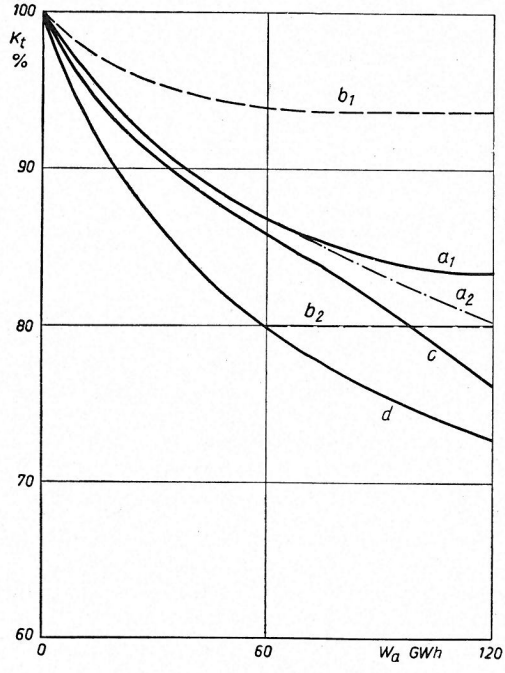
Sl. 146. Potrebna maksimalna snaga termoelektrana za zadovoljenje potreba, a za promatrane kriterije korištenja akumulacije u ovisnosti o energetskoj vrijednosti akumulacije



Sl. 147. Preljevi u hidroelektranama za promatrane kriterije korištenja akumulacije u ovisnosti o energetskoj vrijednosti akumulacije.

bismo da su promjenljivi troškovi za kriterij *c* veći od promjenljivih troškova za kriterij *d*, jer za kriterij *c* imamo veću proizvodnju u manje ekonomičnim termoelektranama, a manju proizvodnju u ekonomičnijim termoelektranama.

S obzirom na veličinu preljeva razlikujemo tri grupe kriterija. Najmanje preljeva izaziva korištenje akumulacije prema kriterijima



Sl. 148. Ukupni troškovi u termoelektranama za promatrane kriterije korištenja akumulacije u ovisnosti o energetskoj vrijednosti akumulacije.

b_1, b_2 i *d*, dok se najveći preljevi javljaju za kriterij *c*. Kriteriji a_1 i a_2 (u našem primjeru) su s obzirom na preljeve istovrijedni, iako to ne mora biti u svim slučajevima, što ovisi o karakteristikama hidroelektrana u sistemu. S obzirom na veličinu preljeva kriteriji a_1 i a_2 nepovoljniji su od kriterija *d* (za veće energetske vrijednosti akumulacije), jer se u prvom slučaju vrše izravnanja proizvodnje u akumulacionim hidroelektranama bez obzira na ostale odnose u elektroenergetskom sistemu.

Na sl. 147 prikazana je ovisnost preljeva o energetskoj vrijednosti akumulacionog bazena. Kao 100% uzeta je količina energije koja se ne može iskoristiti za energetsku vrijednost akumulacije $W_a = 0$.

Uzevši u obzir potrebnu maksimalnu snagu termoelektrana, te potrebnu proizvodnju termoelektrana, dolazimo do ukupnih troškova u termoelektranama za promatrane kriterije korištenja akumulacije (sl. 148). Ukupni troškovi prikazani su u procentima od troškova u termoelektranama potrebnih za zadovoljenje potrošača, kad je $W_a = 0$. Najpovoljniji je, dakle, način korištenja akumulacije prema kriteriju izravnanja termoelektrana. Pri promatranju dijagrama na sl. 148 treba znati, da su troškovi za gorivo određeni uz pretpostavku, da su specifični promjenljivi troškovi konstantni. Sigurno bi se pokazalo — uzevši u obzir krivulje trajanja opterećenja (sl. 144 i 145) — da bi kriterij izravnanja proizvodnje termoelektrana bio još povoljniji u usporedbi s ostalim kriterijima, kad bi se uzela u obzir promjena specifičnih promjenljivih troškova u termoelektranama s angažiranom snagom termoelektrana.

3. Primjena kriterija izravnanja proizvodnje termoelektrana

Usporedba kriterija za korištenje akumulacionih bazena hidroelektrana vršena je uz pretpostavku, da se protoci i u protočnim i u akumulacionim hidroelektranama poznaju unaprijed. Takvu situaciju međutim nećemo imati u stvarnosti, pa je potrebno odrediti onakav način korištenja akumulacionih bazena, kakav možemo očekivati na osnovu pojava u prošlosti uzimajući u obzir najpovoljniji kriterij.

Da se odredi način korištenja akumulacionih bazena, treba poći od stanja izgradnje hidroelektrana u promatranom momentu i od potrebe energije i snage u istom momentu. Poznavajući stanje izgradnje hidroelektrana kao i protoke u nizu godina, mogu se odrediti moguće proizvodnje protočnih hidroelektrana kao i energija koja bi se mogla proizvesti vodom koja dotječe u sezonske akumulacione bazene. Kako je već spomenuto (poglavlje VIII 2c) prilikom određivanja količine energije koja bi se mogla proizvesti dotokom u akumulacije ne treba uzimati u račun veličinu izgradnje hidroelektrana, koje koriste vodu iz sezonskih akumulacionih bazena. Nije ni potrebno posebno naglasiti da se sve proizvodnje hidroelektrana određuju prema neregulirani protocima, pa sumiranjem tako određenih mogućih proizvodnja u svim hidroelektranama za svaku dekadu ili svaki mjesec posebno, dolazimo do polaznih podataka za određivanje sumarne krivulje proizvodnje hidroelektrana (sl. 141). Budući da poznamo — kako smo u početku pretpostavili — i potrebe energije, možemo odrediti i sumarnu krivulju potreba, a iz tih podataka i sumarnu krivulju potrebne proizvodnje termoelektrana uz prirodni dotok vode hidroelektranama.

Daljnje razmatranje provodimo opet uz pretpostavku, da protoke odnosno moguće proizvodnje hidroelektrana kao i potrebe energije poznajemo unaprijed za cijelo razmatrano razdoblje. Uz takvu pretpostavku moći ćemo naravno odrediti najbolje moguće izravnanje

proizvodnje termoelektrana, koje se uz zadane uvjete može postići. Osim toga pretpostavimo da postoji samo jedan akumulacioni bazen, u koji dotječu sve vode, koje dotječu u pojedinačne akumulacione bazene, te da postoji jedna hidroelektrana, koja koristi vodu iz tog zajedničkog akumulacionog bazena. Pretpostavka o jednom akumulacionom bazenu i o jednoj hidroelektrani nužna je kao polazna pretpostavka.

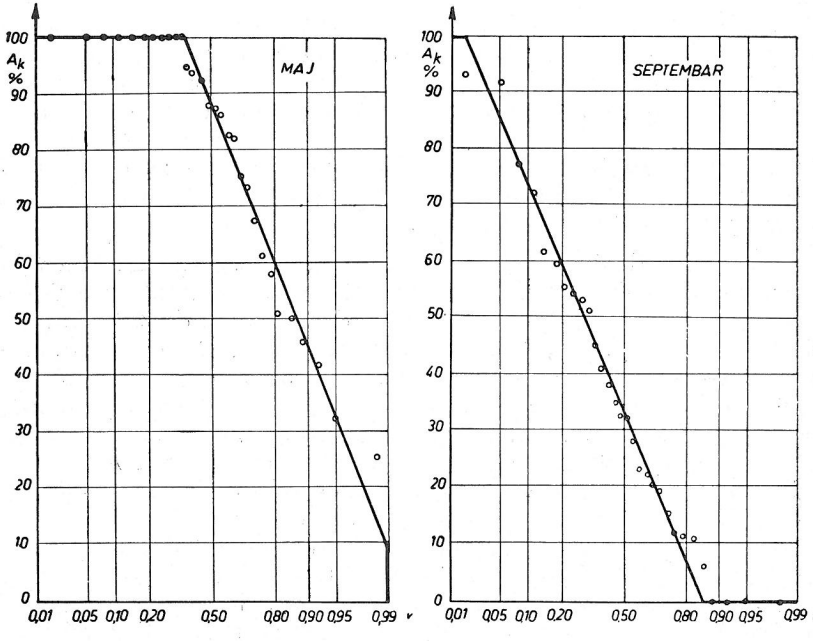
Polazeći od tih pretpostavki možemo moguće izravnanje proizvodnje termoelektrana, a prema tomu i stanje u akumulacionom bazenu, odrediti pomoću sumarnih krivulja kao što je opisano u poglavlju VIII 2d. Pri tome treba voditi računa da se ne akumulira u jednoj dekadi ili jednom mjesecu veća količina vode nego što dotječe u akumulacioni bazen, kao i o tome da se ne prazni akumulacioni bazen s većom količinom vode nego što mogu iskoristiti hidroelektrane koje koriste akumulaciju. Na taj način moguće je odrediti stanje u akumulacionom bazenu krajem svake dekade ili svakog mjeseca, koje treba ostvariti da bi se postiglo što bolje izravnanje proizvodnje termoelektrana uz poznate prirodne protoke i karakteristike hidroelektrana, te uz gore navedene pretpostavke.

Naravno da će se stanja u akumulacionom bazenu u istom mjesecu, ali u različitim godinama, međusobno razlikovati, jer poželjno stanje u akumulaciji ovisi u prvom redu o rasporedu protoka. Na dijagramima na sl. 149, u kojima na apscisi imamo vjerojatnosti, unesena su — primjera radi — stanja u akumulaciji za dva mjeseca (maj i septembar) za prilike u nekom elektroenergetskom sistemu. Na osnovu prilika u tridesetgodišnjem razdoblju na istoj sl. 149 aproksimirane su krivulje vjerojatnosti stanja u akumulacionom bazenu. A polazeći od tako određenih krivulja vjerojatnosti, određujemo krivulju punjenja i pražnjenja akumulacionog bazena uz određenu vjerojatnost stanja u akumulacionom bazenu (sl. 150). Može se smatrati da su stanja u akumulaciji, koja odgovara vjerojatnosti 0,50, stanja koja je poželjno ostvariti, jer će se na taj način najviše približiti zahtjevu izravnanja proizvodnje termoelektrana. Prihvaćanje krivulja punjenja i pražnjenja akumulacionog bazena koje odgovaraju vjerojatnostima manjim od 0,50, sve se više približavamo kriteriju sigurnosti opskrbe potrošača, dok prihvaćanjem krivulja, koje odgovaraju vjerojatnostima većim od 0,50 sve se više približavamo kriteriju štednje goriva u termoelektranama.

Ako prihvatimo prikazanu krivulju punjenja i pražnjenja akumulacionog bazena kao krivulju kojoj treba težiti prilikom određivanja načina punjenja i pražnjenja pojedinih akumulacionih bazena, naravno da neće biti moguće ostvariti onakav raspored proizvodnje termoelektrana, kakav je bio određen pomoću sumarnih krivulja. Glavni je uzrok toj razlici činjenica, što je prilikom određivanja rasporeda proizvodnje termoelektrana pomoću sumarnih krivulja predpostavljeno da su unaprijed za cijelo razmatrano razdoblje poznate protoke, dok za određivanje korištenja akumulacionih bazena pomoću krivulja punjenja i pražnjenja nisu unaprijed poznate protoke. Na sl. 151 prikazane su

za promatrani elektroenergetski sistem krivulje trajanja srednjih mjesečnih opterećenja termoelektrana i to: (a) prema proizvodnjama određenih pomoću sumarnih krivulja i (b) prema proizvodnjama termoelektrana, kad se akumulacioni bazeni pune i prazne prema krivulji na sl. 150.

Za određivanje krivulje (b) na sl. 151 promatran je svaki akumulacioni bazen posebno uzimajući u obzir raspored dotoka te veličinu



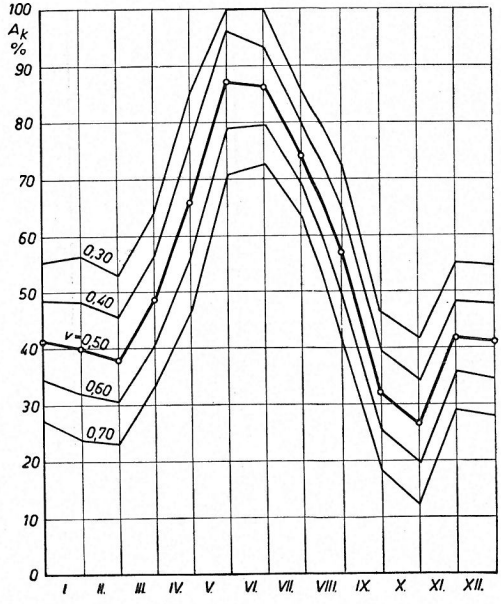
Sl. 149. Primjeri krivulja vrijednosti stanja u akumulacionom bazenu uz korištenje akumulacije prema kriteriju izravnanja proizvodnje termoelektrana.

izgradnje hidroelektrane, koja koristi vodu iz akumulacionog bazena. Zbog toga u krivulji (b) sadržani su i utjecaji pojedinačnih akumulacionih bazena. Prilikom određivanja punjenja i pražnjenja pojedinih akumulacija nastojalo se je što više približiti krivulji punjenja i pražnjenja (sl. 150), ali i odstupajući od te krivulje da bi se u jednom slučaju spriječili preljevi, a u drugom slučaju osigurala minimalna mjesečna proizvodnja u hidroelektrani koja koristi akumulaciju, kako bi se osigurao udio hidroelektrane u pokrivanju vršnog opterećenja.

Naravno da se u svakoj godini ne može ostvariti punjenje i pražnjenje akumulacionog bazena prema krivulji koja je poželjna, jer će se nekada u mjesecima u kojima je predviđeno punjenje pojaviti male

protoke, odnosno u mjesecima kad je predviđeno pražnjenje velike protoke, pa pražnjenje i punjenje treba tako predvidjeti da se što više približi poželjnoj krivulji punjenja i pražnjenja.

Krivulja punjenja i pražnjenja određena na opisani način ima smisla, kad se može predviđeni postotak za pražnjenje akumulacionog bazena korisno upotrijebiti u nizvodnoj hidroelektrani. Pri tome treba

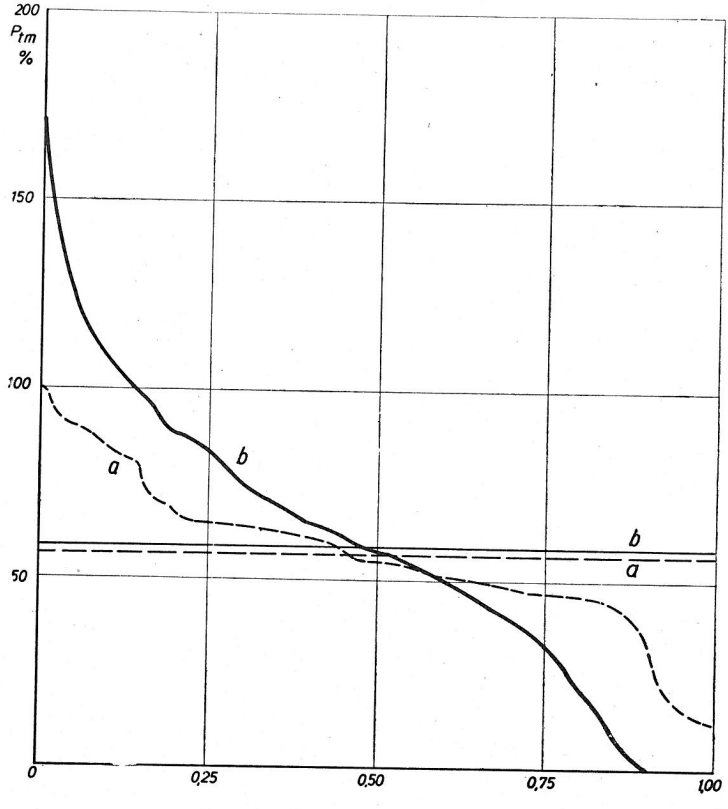


Sl. 150. Krivulje punjenja i pražnjenja akumulacionih bazena uz uvjet iste vjerojatnosti stanja u akumulaciji. Krivulje određene prema krivuljama vjerojatnosti (sl. 149).

uzeti u obzir i dotok koji dotječe u akumulacioni bazen, jer i njega treba iskoristiti u nizvodnoj hidroelektrani. Radi toga — kad se radi o relativno velikim akumulacijama — treba volumen akumulacije ili energetsku vrijednost akumulacije podijeliti u dva dijela: jedan dio koji se puni i prazni prema krivulji punjenja i pražnjenja za jednu godinu (određenoj na opisani način), i drugi dio akumulacionog bazena, koji se koristi prema krivulji punjenja i pražnjenja za dugi niz godina.

Da odredimo koliki W_{ao} akumulacionog bazena treba upotrijebiti za osiguranje godišnjih oscilacija stanja u akumulacionom bazenu, pođimo od krivulje punjenja i pražnjenja, koje je primjer prikazan na sl. 150. Najveće pražnjenje $\Delta A_{k\,max}\%$ imamo u našem primjeru u mjesecu septembru, pa je potrebno — zbog prilika u elektroenergetskom sistemu — osigurati i mogućnost korištenja količine vode, koja se ispušta iz akumulacionog bazena. Osim količine vode, koja odgovara

pražnjenju bazena, treba naravno iskoristiti i onu količinu vode koja dotječe u akumulacioni bazen. Računajmo da gore spomenute zahtjeve treba ispuniti i onda kada u akumulacioni bazen dotječe srednji mjesečni dotok u promatranom mjesecu. Označimo da se srednjim mjesečnim dotokom može u nizvodnoj hidroelektrani proizvesti W_{ms} energije.



Sl. 151. Krivulje trajanja srednjih mjesečnih opterećenja termoelektrana u promatranom sistemu: (*a*) određena uz pretpostavku da se unaprijed poznaju protoci za cijelo razmatrano razdoblje, a prema kriteriju izravnanja proizvodnje u termoelektranama, (*b*) određena prema krivulji punjenja i pražnjenja (50%) na sl. 150.

Ako s $W_{h\max}$ označimo maksimalnu mjesečnu proizvodnju u hidroelektrani, koja koristi vodu iz akumulacionog bazena, mora biti ispunjen slijedeći uvjet

$$W_{h\max} = W_{ms} + \frac{\Delta A_{k\max} W_{ao}}{100} \tag{238}$$

Dio W_{ao} akumulacionog bazena, koji treba iskoristiti za osiguranje godišnjih oscilacija, iznosi

$$W_{ao} = \frac{W_{h\,\max} - W_{ms}}{\Delta A_{k\max}} 100 \tag{239}$$

To je prema tome energetska vrijednost akumulacionog bazena, na koju se odnose procenti, pomoću kojih je na sl. 150 definirana krivulja punjenja i pražnjenja akumulacionog bazena. To vrijedi za slučajeve, kad je stvarna energetska vrijednost akumulacije W_a veća od W_{ao}, dok za slučajeve, kad je $W_a < W_{ao}$, energetska vrijednost akumulacije W_{ao} nema nikakvog značenja, pa krivulju punjnja i pražnjenja treba odrediti prema W_a.

Ako je međutim $W_a > W_{ao}$, drugi dio akumulacionog bazena, čija je energetska vrijednost definirana relacijom

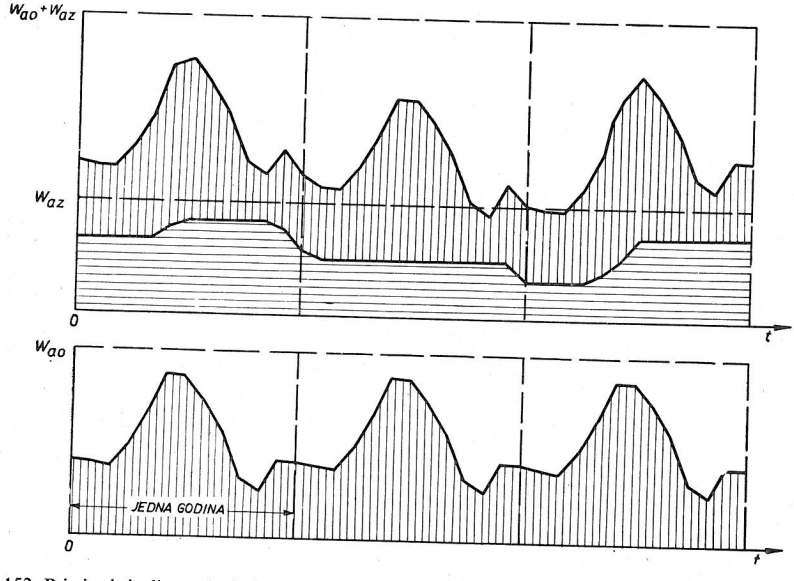
$$W_{az} = W_a - W_{ao} \tag{240}$$

ne sudjeluje u godišnjim oscilacijama stanja u akumulacionom bazenu, već služi za povećanje proizvodnje u naročito sušnim mjesecima ili dekadama, s tim da se taj dio akumulacionog bazena puni u mjesecima ili dekadama u kojima je proizvodnja hidroelektrana naročito velika.

Prema tome predviđaju se dvije krivulje punjenja i pražnjenja: prva, s periodom jedne godine, a druga sa znatno duljim periodom manjim (najčešći je period cijeli niz godina za koji se vrše razmatranja).

Postavlja se pitanje kako odrediti oscilacije drugog dijela akumulacionog bazena. Očito je da se ne može odrediti krivulja punjenja i pražnjenja, koja bi se mogla upotrijebiti i prilikom projektiranja i u eksploataciji. Uzrok je tomu što ne postoji zakonitost pojava vrlo sušnih i vrlo vlažnih mjeseci i dekada u nizu godina, koja bi se na osnovu prošlosti mogla predvidjeti za budućnost. Međutim određivanje korištenja drugog dijela akumulacije (W_{az}) potrebno je, da bi se prilikom projektiranja mogla odrediti mogućnost proizvodnje promatrane hidroelektrane, kao i ulogu hidroelektrane u elektroenergetskom sistemu. Pri tome treba nastojati da se određeni način korištenja što više približi onome, koji će se — ne uzimajući u obzir čas kad će do toga doći — ostvariti za vrijeme eksploatacije. Sigurno je međutim da će s obzirom na prilike u elektroenergetskom sistemu biti povoljno, da se drugi dio akumulacionog bazena prazni kad je potrebna vrlo velika proizvodnja iz termoelektrana, odnosno da se akumulacioni bazen puni kad je potrebna mala količina energije iz termoelektrana. Koji su to mjeseci ili dekade kad je poželjno punjenje odnosno pražnjenje drugog dijela akumulacionog bazena, može se odrediti na osnovu mjesečnih ili dekadnih proizvodnja u hidroelektranama sistema nakon što je korišten prvi dio akumulacije. Općenito se može utvrditi, da u pojavi vrlo vlažnih

i vrlo sušnih mjeseci nema nikakove zakonitosti, pa nije moguće ni postaviti općenito pravilo za izbor tih mjeseci. Može se međutim reći, da izbor mjeseci ovisi o veličini drugog dijela akumulacionog bazena i o veličini izgradnje hidroelektrane, koja koristi vodu iz akumulacionog bazena. Budući da je od interesa za elektroenergetski sistem, da se po mogućnosti osigura maksimalna proizvodnja u nizvodnoj hidroelektrani, koja koristi akumuliranu vodu (a maksimalna je proizvodnja



Sl. 152. Primjer krivulja punjenja i pražnjenja za veliki akumulacioni bazen. W_{ao} prvi dio, W_{az} drug dio akumulacionog bazena.

ovisna o veličini izgradnje), treba poći od tog zahtjeva prilikoj određivanja mjeseci ili dekada kad treba puniti odnosno prazniti akumulacioni bazen. U koliko mjeseci ili dekada bit će moguće ostvariti gore navedeni zahtjev ovisi o vremenskom redoslijedu vrlo sušnih i vrlo vlažnih vremenskih razdoblja, o veličini drugog dijela akumulacije, o dotoku u akumulacioni bazen u tim razdobljima, te o potrebi punjenja i pražnjenja prvog dijela akumulacionog bazena u tim razdobljima. Postavljajući zahtjev da hidroelektrana u vrlo sušnim razdobljima treba da radi trajno s maksimalnom snagom, i odabirući broj tih vrlo sušnih razdoblja (mjesec ili dekada) tako da se smanji najstrmiji dio krivulje na sl. 151, može se pokušavanjem doći do broja vrlo sušnih razdoblja u kojima treba prazniti drugi dio akumulacionog bazena. Koliki je broj razdoblja u kojem treba puniti akumulacioni bazen prema broju razdoblja u kojima je predviđeno pražnjenje drugog dijela

akumulacionog bazena, ovisi o međusobnom vremenskom rasporedu vrlo vlažnih i vrlo sušnih razdoblja, o veličini drugog dijela akumulacionog bazena, kao i o dotoku u akumulacioni bazen u usporedbi s hidrološkim karakteristikama ostalih hidroelektrana sistema.

Na osnovu takve analize dolazi se do definiranih razdoblja (dekada, mjesec i godina) u kojima treba puniti odnosno prazniti drugi dio akumulacionog bazena, dok je količina koju treba uzeti iz akumulacije određena veličinom izgradnje uzevši u obzir dotok u akumulaciju i potrebu održavanja oscilacije stanja u prvom dijelu akumulacionog bazena, a količina kojom treba puniti drugi dio akumulacije samo održavanjem oscilacije prvog dijela akumulacionong bazena.

DEVETO POGLAVLJE

INSTALIRANA SNAGA HIDROELEKTRANA I VELIČINA AKUMULACIONOG BAZENA

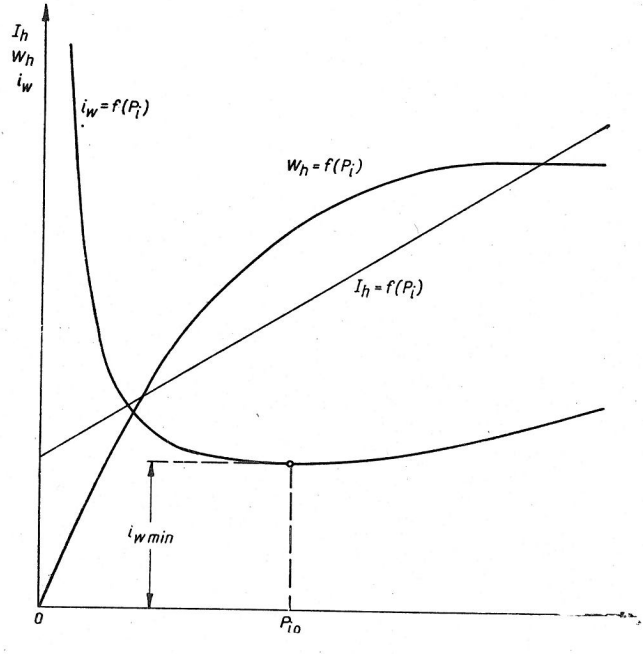
1. Specifične i dodatne specifične investicije hidroelektrana

a) Specifične investicije

Ovisnost potrebnih investicija za izgradnju hidroelektrane možemo aproksimirati [30] izrazom

$$I_h = A + BP_i \tag{241}$$

gdje su A i B konstante ovisne o terenskim uvjetima i o tipu hidro-



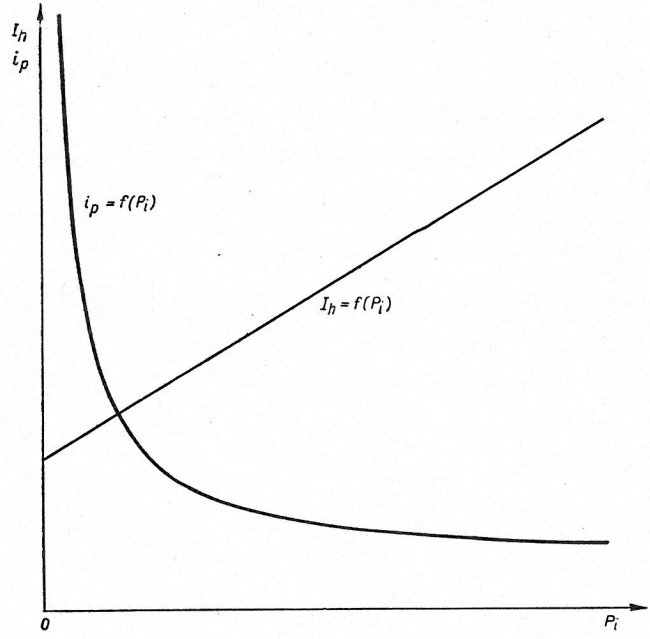
Sl. 153. Ovisnost moguće proizvodnje W_h, investicija I_h i specifičnih investicija i_w po kWh o instaliranoj-snazi hidroelektrane.

elektrane, a P_i instalirana snaga. Na veličinu A ima glavni utjecaj brana, a na B dovod i pad.

Omjer između investicija i moguće proizvodnje

$$i_w = \frac{I_h}{W_h} \tag{242}$$

nazivamo specifičnim investicijama po jedinici proizvodnje hidroelektrane. Za promatranu hidroelektranu investicije su funkcija instalirane



Sl. 154. Ovisnost investicija I_h i specifičnih investicija i_p po kW o instaliranoj snazi hidroelektrane.

snage (241); moguća proizvodnja je također funkcija instalirane snage, pa su to i specifične investicije i_w. Na sl. 153 prikazan je tok tih funkcija. Funkcija $i_w = f(P_i)$ ima kod P_{io} minimum, pa se uz tu instaliranu snagu postiže i najniža cijena proizvodnje, jer su godišnji troškovi proporcionalni s investicijama. Minimalne specifične investicije nisu, međutim, kriterij — kako ćemo kasnije vidjeti — za veličinu izgradnje, pa ni P_{io} nije optimalna veličina izgradnje hidroelektrane. I pored toga specifične investicije po jedinici proizvodnje mogu dati prvu indikaciju o ekonomičnosti hidroelektrane.

Osim toga specifične investicije po jedinici snage možemo definirati izrazom

$$i_p = \frac{I_h}{P_i} = \frac{A}{P_i} + B \tag{243}$$

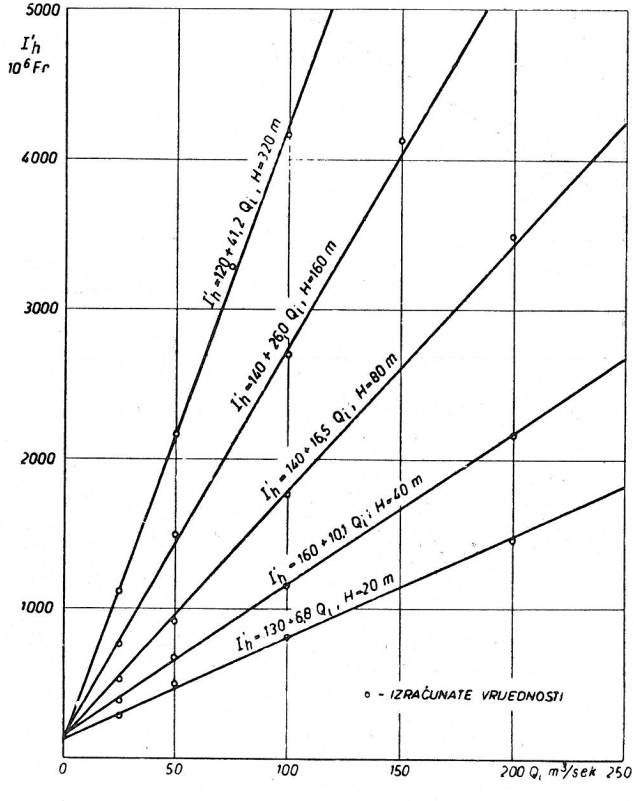
čiji je tok prikazan na sl. 154. Iz izraza (243) i iz dijagrama na sl. 154 vidljivo je da za konačnu vrijednost P_i specifične investicije i_p ne dostižu minimum. Na osnovu toga se može zaključiti da specifične investicije i_p ne mogu biti ni indikacija o ekonomičnosti hidroelektrane, jer se povećanjem instalirane snage hidroelektrane mogu sniziti specifične investicije, pa će — uz inače iste uvjete — izgledati da je hidroelektrana s većom instaliranom snagom povoljnija.

b) Dodatne specifične investicije

Konstanta B predstavlja potreban porast investicija za povećanje instalirane snage za 1 kW, pa je možemo nazvati dodatnim specifičnim investicijama.

Izraz za investicije možemo napisati i u obliku

$$I_h = A + B_1 Q_i \tag{244}$$



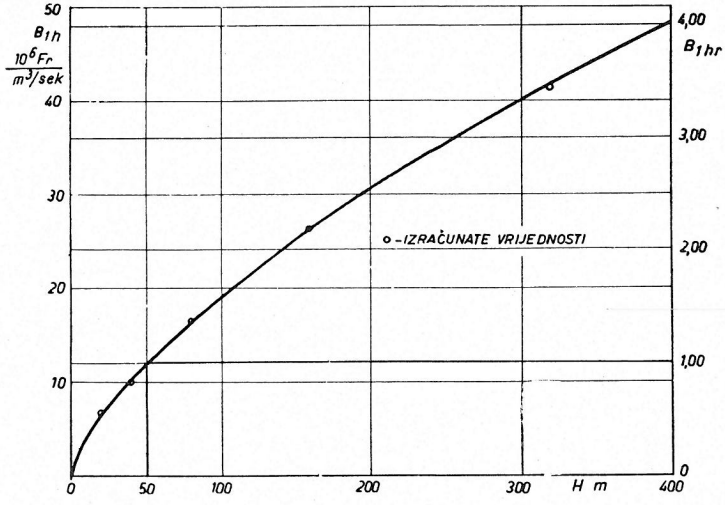
Sl. 155. Ovisnost investicija I'_h, koje su funkcija veličine izgradnje, o veličini izgradnje Q_i m³/sek i padu H.

gdje je Q_i veličina izgradnje hidroelektrane, a B_1 dodatne specifične investicije po m³/sek. Uzevši u obzir relaciju (53), B_1 možemo odrediti i pomoću B iz izraza

$$B_1 = kHB \tag{245}$$

Iz daljnjeg razmatranja moći ćemo ustanoviti da dodatne investicije možemo podijeliti u dva dijela: prvi, B_h odnosno B_{1h} koji je ovisan o padu, i drugi, B_l odnosno B_{1l} koji je u najvećoj mjeri ovisan o duljini dovoda i odvoda, a tek u manjoj mjeri o veličini izgradnje.

Da bismo odijelili prvi od drugog dijela dodatnih investicija, promotrimo najprije dodatne investicije za pribransku hidroelektranu, jer ona nema ni dovoda ni odvoda. Da bi se utvrdile spomenute dodatne



Sl. 156. Ovisnost dodatnih specifičnih investicija B_{1h} po m³/sek u ovisnosti o padu H.

investicije, određene su ukupne investicije za turbine, generatore, transformatore, pomoćne pogone, rasklopno postrojenje, cjevovod s pripadnim uređajima, dizalicu i zgradu strojarnice, dakle, za sve dijelove koji ovise o veličini izgradnje Q_i i o padu H. Investicije su izračunate uz slijedeće pretpostavke: u hidroelektrani su postavljena tri agregata, generatori su spojeni u bloku s transformatorima na sabirnice 30 kV (ukoliko je snaga jednog generatora manja od 10 MVA) odnosno na sabirnice 110 kV, broj cjevovoda je jednak broju agregata, a njihova je duljina za 50% veća od pada. Težine i cijene pojedinih dijelova postrojenja određene su prema podacima u [31]. Ukupne investicije su određene za veličine izgradnje 25, 50, 100 i 200 m³/sek i za padove od 20, 40 i 80 m, za pad od 160 m i za veličine izgradnje od 25, 50,

100 i 150 m³/sek, te konačno za pad od 320 m i veličine izgradnje od 25, 50, 75 i 100 m³/sek. Unošenjem izračunatih investicija I'_h u dijagram na sl. 155 u ovisnosti o veličini izgradnje, dolazimo do zaključka da ovisnost investicija o veličini izgradnje uz konstantni pad možemo aproksimirati pravcem. Jednadžba tih pravaca glasi

$$I'_h = A' + B_{1h} Q_i \tag{246}$$

Ako desnoj strani izraza dodamo još investicije A'' potrebne za izgradnju brane i za ostale radove, koji su svi neovisni o veličini izgradnje i o padu, doći ćemo do izraza za ukupne investicije koji vrijedi za pribransku hidroelektranu.

Polazeći od pravaca na sl. 155 možemo, dalje, zaključiti da je veličina A' konstantna i da je praktički neovisna o padu, pa je $B_{1h} = f(H)$. Unošenjem vrijednosti za B_{1h} u dijagram na sl. 156, možemo odrediti aproksimaciju ovisnosti B_{1h}, koju možemo dalje prikazati izrazom

$$B_{1h} = 0{,}89 \sqrt[3]{H^2}\, 10^6 \text{ Fr/m}^3\text{/sek} \tag{247}$$

Da bismo prešli na relativne vrijednosti dodatnih specifičnih investicija B_{1hr}, postavimo da relativne dodatne specifične investicije za pad $H = 50$ iznose $B_{1hr} = 1{,}00$, pa će izraz za relativne specifične dodatne nvesticije glasiti

$$B_{1hr} = 0{,}0738 \sqrt[3]{H^2} \tag{248}$$

u koji treba uvrstiti H u metrima.

Iz izraza (247) i (248) možemo odrediti i ovisnost dodatnih specifičnih investicija po jedinici snage B_h. Između dodatnih specifičnih investicija B_{1h} i B_h vrijedi isti odnos koji vrijedi za B_1 i B (245), pa ako još postavimo za $k = 8$ (poglavlje II 2), dobivamo za dodatne specifične investicije po jedinici snage izraz

$$B_h = \frac{111}{\sqrt[3]{H}}\, 10^3 \text{ Fr/kW} \tag{249}$$

Ako i sada postavimo da su relativne specifične dodatne investicije $B_{hr} = 1{,}00$ za pad $H = 50$, izraz za relativne specifične dodatne investicije glasi

$$B_{hr} = \frac{3{,}684}{\sqrt[3]{H}} \tag{250}$$

Ovisnost B_h i B_{hr} o padu prikazana je na sl. 157.

S povećanjem pada specifične dodatne investicije po jedinici snage se smanjuju, pa je ekonomski opravdano da se pribranske hidroelektrane, ali s velikim padom, predvide kao vršne hidroelektrane. U praksi, međutim, osim u iznimnim slučajevima, nije moguće postići velike padove u pribranskim hidroelektranama (ili u hidroelektranama s vrlo kratkim dovodom), pa dodatne specifične investicije prikazane na sl. 157 za velike padove imaju samo teorijsku i usporednu vrijednost.

Za hidroelektrane s nešto duljim dovodom, duljina dovoda ima odlučan utjecaj na dodatne investicije, pa je taj utjecaj — da bi se dobila slika o dodatnim specifičnim investicijama u ovisnosti o duljini dovoda — potrebno detaljnije razmotriti.

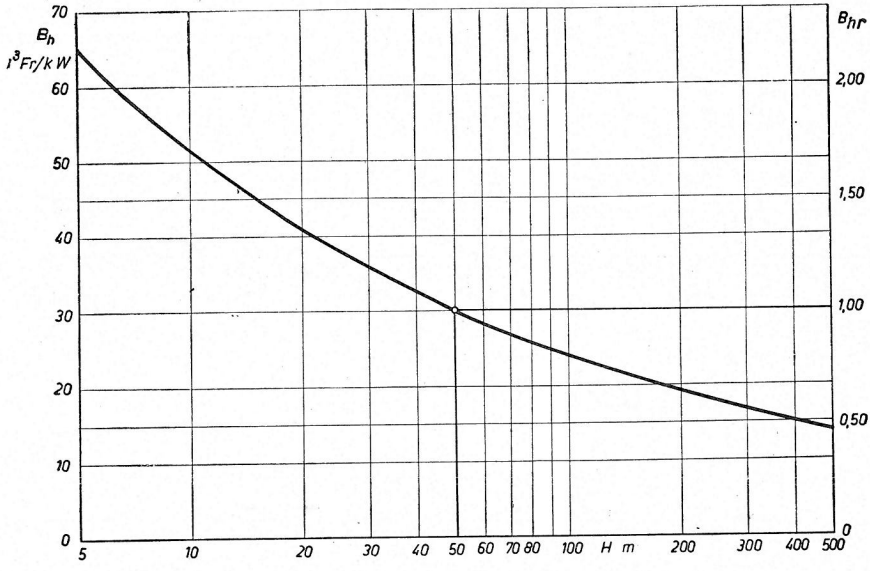
Na osnovu podataka u [31] uz konstantnu brzinu vode u tunelu ($v = 3$ m/sek), a za tunel relativne hrapavosti 0,02% s oblogom koja odgovara tlaku od 10 do 30 m s. v. za zdravu stijenu, može se odrediti slijedeći izraz za investicije po km tunela

$$i'' = 11{,}3\, Q^{0{,}73}\ 10^6 \text{ Fr/km} \tag{251}$$

Za male duljine tunela ($L \leq 2$ km) ukupne investicije dobivaju se množenjem izraza (251) s duljinom tunela, pa je

$$I''_h = 11{,}3\, Q^{0{,}73}\, L\ 10^6 \text{ Fr} \tag{252}$$

Za veće duljine tunela potrebno je investicije povećati u ovisnosti o



Sl. 157. Ovisnost dodatnih specifičnih investicija B_h po kW u ovisnosti o padu H.

duljini dionice odnosno o broju napadnih tačaka. Povećanje investicija u postocima po jedinici duljine jedne dionice iznosi

$$\lambda = 8{,}6\,(L' - 1)\,\%\tag{253}$$

što znači da nema povećanja investicija ukoliko je duljina jedne dionice $L' \leqq 1$ km, a negativne vrijednosti za λ ne ulaze u račun. Ako pretpostavimo da za izgradnju tunela postoje samo dvije napadne tačke, povećanje investicija λ dobit ćemo kad postavimo $L' = 0{,}5\,L$, pa je

$$\lambda = 4{,}3\,(L - 2)\,\%\tag{254}$$

Ukupne investicije iznose

$$I''_h = 11{,}3\,Q^{0{,}73}\,L\left(1 + \frac{\lambda}{100}\right)10^6 F_r\tag{255}$$

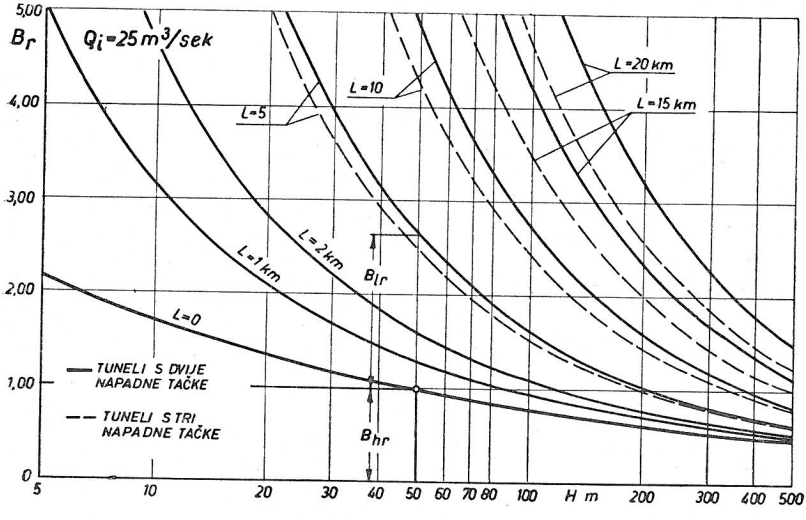
odnosno nakon uvrštavanja vrijednosti za λ dobivamo

$$I''_h = 11{,}3\,Q^{0{,}73}\,L\,(0{,}914 + 0{,}043\,L)\;10^6\,\mathrm{Fr}\tag{256}$$

Izraz (256) vrijedi za $L > 2$ km.

Ako, međutim, za izgradnju tunela stoje na raspolaganju tri napadne tačke, od kojih je jedna u sredini trase tunela, treba u (253) za L' uvrstiti 0,25 L, pa izraz za investicije glasi

$$I''_h = 11{,}3\,Q^{0{,}73}\,L\,(0{,}914 + 0{,}0215\,L)\;10^6\,\mathrm{Fr}\tag{257}$$



Sl. 158. Ovisnost ukupnih specifičnih investicija $B_r = B_{hr} + Bl_r$ po kW u ovisnosti o padu H i o duljini dovoda L km za $Q_i = 25$ m³/sek.

Dodatne investicije za povećanje veličine izgradnje za 1 m³/sek možemo odrediti diferenciranjem izraza (252), (256) ili (257) po veličini izgradnje, pa za $L \leqq 2$ km dobivamo

$$B_{1l} = 8{,}25\ Q^{-0{,}27}\ L\ 10^6\ \mathrm{Fr/m^3/sek} \tag{258}$$

Za $L > 2$ km, a za slučaj da postoje dvije napadne tačke, treba desnu stranu izraza (258) pomnožiti veličinom u zagradi izraza (256), dok za slučaj triju napadnih tačaka to isto treba načiniti veličinom u zagradi izraza (257).

I sada možemo iz (258) pomoću (245) prijeći na dodatne specifične investicije po jedinici snage, pa za $L \leqq 2$ km dobivamo

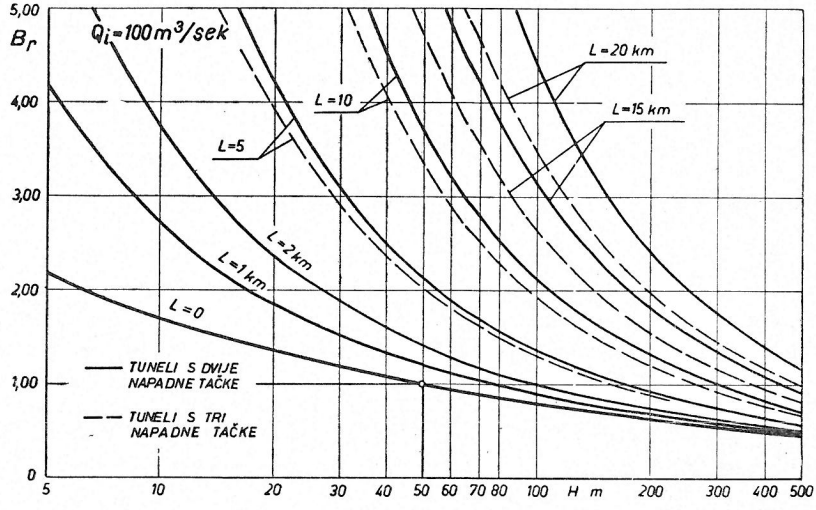
$$B_l = 1030\ \frac{L}{Q^{0{,}27}\,H}\ 10^3\ \mathrm{Fr/kW}. \tag{259}$$

Za $L > 2$ km uz dvije napadne tačke imamo

$$B_l = 1030\ \frac{L}{Q^{0{,}27}\,H}\ (0{,}914 + 0{,}043\ L)\ 10^3\ \mathrm{Fr/kW} \tag{260}$$

a uz tri napadne tačke

$$B_l = 1030\ \frac{L}{Q^{0{,}27}\,H}\ (0{,}914 + 0{,}0215\ L)\ 10^3\ \mathrm{Fr/kW} \tag{261}$$



Sl. 159. Ovisnost ukupnih dodatnih specifičnih investicija $B_r = B_{hr} + Bl_r$ po kW u ovisnosti o padu H i o duljini dovoda L km za $Q_i = 100$ m³/sek.

Zbroj dodatnih specifičnih investicija B_{1h} i B_{1l}, odnosno B_h i B_l, daje ukupne dodatne specifične investicije

$$B = B_h + B_l \tag{262}$$

Na sl. 158 i 159 prikazana je ovisnost ukupnih relativnih dodatnih specifičnih investicija o padu za veličine izgradnje 25 i 100 m³/sek, te za tunele s dvije i tri napadne tačke.

Dodatne specifične investicije po jedinici snage opadaju s povećanjem pada, a rastu s povećanjem duljine dovoda, i to tim brže što je pad manji.

Konačno treba napomenuti da izračunate dodatne investicije daju samo indikaciju o njihovoj veličini, jer analitičkim izrazima nije moguće obuhvatiti sve utjecaje na visinu investicija. Međutim, i pored toga prikazana ovisnost dodatnih investicija može dati sliku njihove relativne visine.

2. Optimalna instalirana snaga hidroelektrane

a) Određivanje optimalne instalirane snage hidroelektrane

Polazeći od zahtjeva da opskrbimo potrošače potrebnom snagom i potrebnom količinom energije uz što manje troškove u promatranom elektroenergetskom sistemu, optimalnu instaliranu snagu hidroelektrane možemo odrediti iz slijedećeg razmatranja.

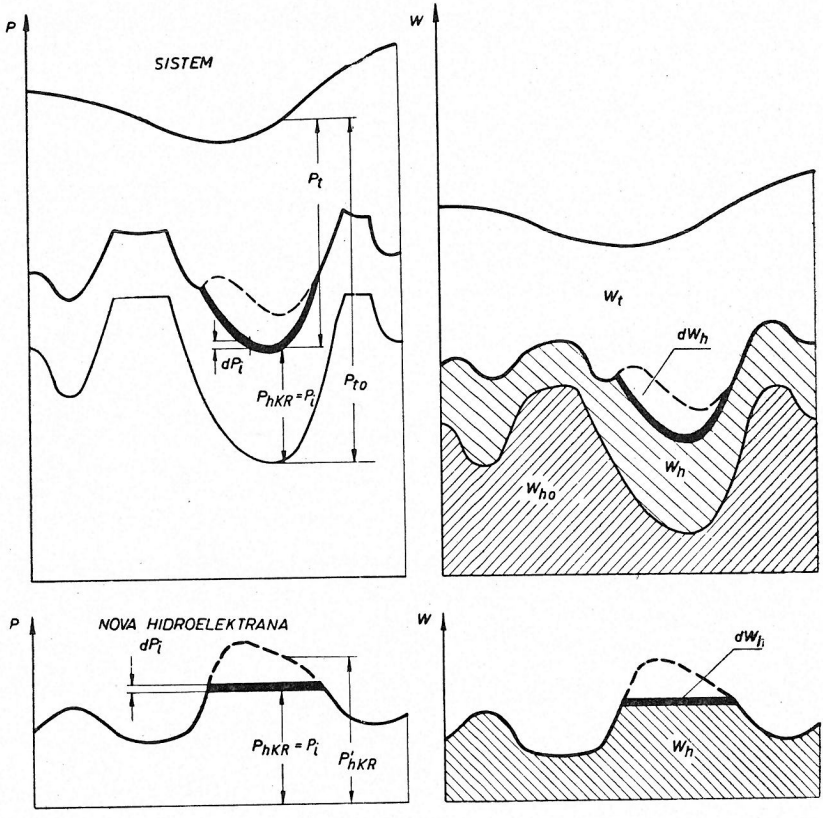
Razmotrimo prilike u elektroenergetskom sistemu u kojem već postoje hidroelektrane i termoelektrane. Zbog porasta potrošnje odlučeno je da se izgradi nova hidroelektrana. Ali, u općem slučaju, radi dopune bit će potrebno povećati i instaliranu snagu termoelektrana, bilo izgradnjom novih bilo proširenjem postojećih termoelektrana.

Ukupne potrebe energije W bit će tada zadovoljene proizvodnjom u postojećim hidroelektranama W_{ho}, proizvodnjom u novoj hidroelektrani W_h i proizvodnjom u termoelektranama W_t (sl. 160 i 161).

$$W = W_{ho} + W_h + W_t \tag{263}$$

Veličine W_{ho} i W_h predstavljaju moguću proizvodnju hidroelektrana, jer se pretpostavlja da se sva energija može plasirati u mrežu. Ta se pretpostavka može prihvatiti, jer možemo računati da će barem nekoliko godina nakon izgradnje nove hidroelektrane konzum toliko porasti da će biti osigurano iskorištenje ukupne moguće proizvodnje spomenutih hidroelektrana.

Uz povećanje proizvodnje ukupni troškovi K se sastoje iz troškova u postojećim hidroelektranama K_{ho}, u novoj hidroelektrani K_h i u termoelektranama K_t, pa je



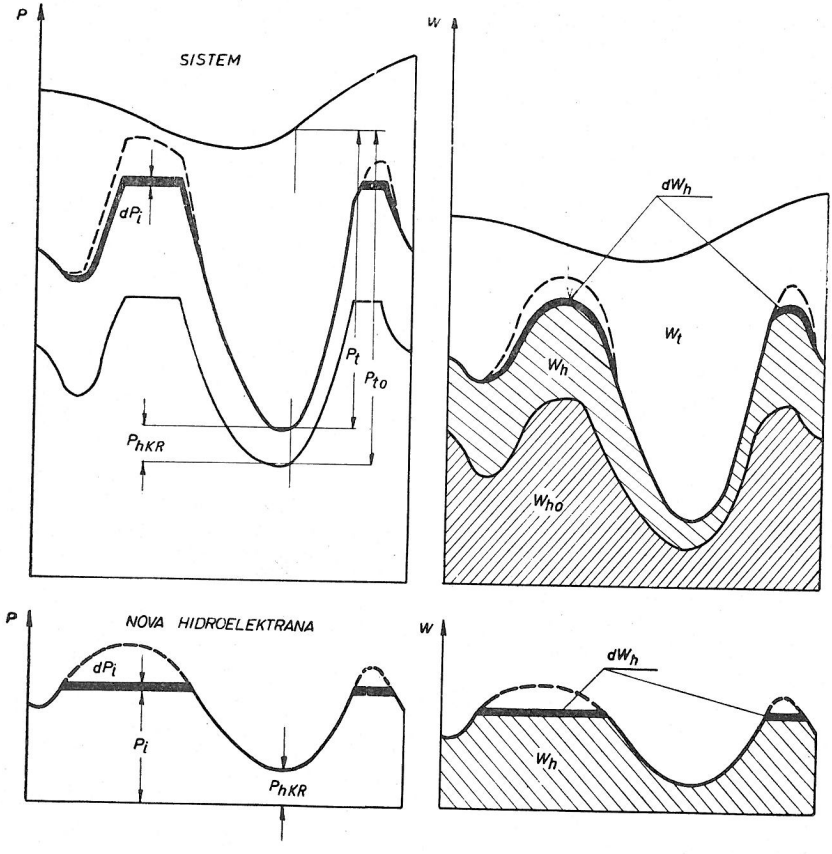
Sl. 160. Prilike u elektroenergetskom sistemu nakon izgradnje nove hidroelektrane za slučaj kad je $P_{hKR} = P_i$ i kad se poveća instalirana snaga za dP_i.

$$K = K_{ho} + K_h + K_t \tag{264}$$

Ako troškove u termoelektranama odredimo uz pretpostavku da su specifični promjenljivi troškorvi k_b konstanta, ako s b_t označimo stalne specifične troškove u termoelektranama po jedinici snage, a s ϱ faktor rezerve, te ako uzmemo u obzir relaciju (263), izraz za troškove možemo napisati u obliku

$$K = K_{ho} + K_h + \varrho\, b_t\, P_t + k_b\,(W - W_{ho} - W_h) \tag{265}$$

gdje je P_t potrebna raspoloživa snaga u termoelektranama u kritičnom razdoblju. Tu snagu možemo prikazati kao razliku između potrebne snage termoelektrana P_{to} koja bi bila potrebna kad se ne bi gradila



Sl. 161. Prilike u elektroenergetskom sistemu nakon izgradnje nove hidroelektrane za slučaj kad je $P_{hKR} < P_i$ i kad se poveća instalirana snaga za dP_i.

nova hidroelektrana, i iskoristive snage nove hidroelektrane P_{hKR} u kritičnom razdoblju, pa je (sl. 160 i 161)

$$P_t = P_{to} - P_{hKR} \tag{266}$$

Uzevši u obzir (266), relacija (265) glasi

$$K = K_{ho} + K_h + \varrho\, b_t\,(P_{to} - P_{hKR}) + k_b\,(W - W_{ho} - W_h) \tag{267}$$

U izrazu (267) dolazi veličina P_{hKR} koju moramo tačnije razmotriti, jer ima, kako ćemo vidjeti, odlučan utjecaj na daljnje izvode. Veličina P_{hKR} je ovisna o veličini izgradnje hidroelektrane Q_i, odnosno o instaliranoj snazi hidroelektrane P_i, samo onda kad je snaga P'_{hKR}

(sl. 160), koju bi promatrana hidroelektrana mogla proizvesti u kritičnom razdoblju — s obzirom na raspoloživu vodu i s obzirom na njen položaj u dijagramu opterećenja —, veća od instalirane snage. To se može dogoditi kad su protoci u promatranoj hidroelektrani u kritičnom razdoblju veliki, bilo radi rasporeda prirodnih protoka, bilo radi postojanja akumulacije, ili kad imamo takve prilike u elektroenergetskom sistemu da se u kritičnom razdoblju i uz manje protoke može iskoristiti velika snaga iz hidroelektrana. U takvim slučajevima (sl. 160) u izraz (267) treba postaviti

$$P_{hKR} = P_i \tag{268}$$

jer snaga koju hidroelektrana može proizvesti u kritičnom razdoblju ne može biti veća od P_i.

Ako je, međutim, snaga P_{hKR} manja od P_i (sl. 162), snaga u kritičnom razdoblju je neovisna o instaliranoj snazi, jer — ma koliko povećali instaliranu snagu P_i — ne možemo utjecati na veličinu P_{hKR}. Dakle, tada je P_{hKR} = konst.

Veličina P_{hKR} ovisna je o godišnjem rasporedu protoka postojećih hidroelektrana i nove hidroelektrane. Međutim, u većini praktičkih slučajeva, jer je raspored protoka u postojećoj hidroelektrani sličan rasporedu u novoj hidroelektrani, snaga P_{hKR} je mala i ne razlikuje se znatno od minimalne snage nove hidroelektrane. U hidroelektranama sa znatno drukčijim rasporedom protoka, kao i u hidroelektranama sa sezonskim akumulacijama, snaga P_{hKR} može biti i vrlo velika.

Jednadžbu (267) moramo promatrati za dva slučaja. Za $P_i < P'_{hKR}$ (sl. 160) imamo

$$K = K_{ho} + K_h + \varrho\, b_t (P_{to} - P_i) + k_b (W - W_{ho} - W_h) \tag{269}$$

dok za $P_i > P'_{hKR}$ (sl. 161) jednadžba (267) ostaje nepromijenjena uz napomenu da je P_{hKR} = konst. za promatranu hidroelektranu.

Optimum za elektroenergetski sistem bit će postignut kad ukupni troškovi K budu minimalni. Treba, dakle, odrediti veličinu izgradnje nove hidroelektrane kojom se može postići opskrba potrošača uz minimalne troškove, vodeći pri tome računa o postojećim hidroelektranama. S obzirom na veličinu izgradnje nove hidroelektrane, troškovi u postojećim hidroelektranama K_{ho}, kao i njihove proizvodnje W_{ho}, specifični stalni troškovi u termoelektranama b_t, faktor rezerve ϱ, potrebna snaga termoelektrana prije izgradnje nove hidroelektrane P_{to} (sl. 160 i 161), specifični promjenljivi troškovi u termoelektranama k_b, te ukupne potrebe energije W neovisni su o veličini izgradnje P_i. Godišnji troškovi nove hidroelektrane K_h funkcija su instalirane snage P_i, što vrijedi i za proizvodnju nove hidroelektrane W_h. Budući da je $W_h = f(P_i)$, odnosno $P_i = \varphi(W_h)$, to je i $K_h = f(W_h)$, pa su i ukupni troškovi K funkcija moguće proizvodnje W_h. Deriviranjem izraza

(269) i (267) po W_h možemo, dakle, odrediti i uvjet minimuma troškova u elektroenergetskom sistemu.

Promotrimo najprije slučaj kad je $P_i < P'_{hKR}$. Deriviranjem izraza (269) dobivamo jedan od uvjeta za minimum troškova

$$\frac{dK}{dW_h} = \frac{dK_h}{dW_h} - \varrho b_t \frac{dP_i}{dW_h} - k_b = 0 \tag{270}$$

koji možemo napisati u obliku

$$k_b = \frac{dK_h}{dW_h} - \varrho\, b_t \frac{dP_i}{dW_h} \tag{271}$$

Druga derivacija izraza (269) bit će uvijek pozitivna ako je ispunjena nejednadžba

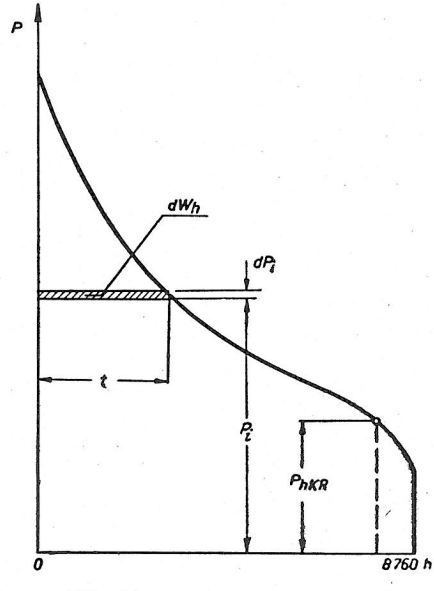
$$\frac{dK_h}{dP_i} > \varrho\, b_t \tag{272}$$

pa će postojati i minimum funkcije (269).

Ukoliko je, međutim,

$$\frac{dK_h}{dP_i} < \varrho\, b_t \tag{273}$$

najmanji mogući troškovi bit će postignuti za najveći P_i, za koji još



Sl. 162. Krivulja trajanja snage hidroelektrane s naznačenom snagom P_{hKR} u kritičnom razdoblju i utjecaj povećanja instalirane snage za dP_i ($t = dW_h/dP_i$).

vrijedi jednadžba (269). Prema tome optimalna instalirana snaga hidroelektrane — u ovom slučaju — bit će jednaka P_{hKR}.

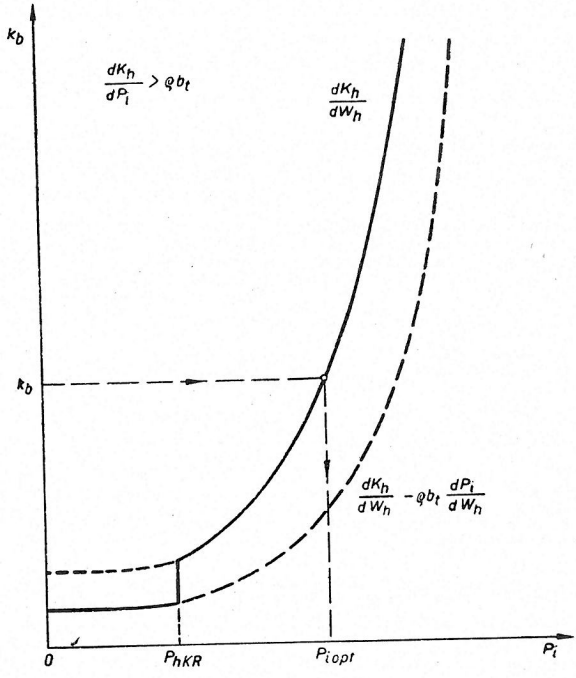
Promotrimo sada slučaj kad je $P_i > P_{hKR}$. Sada derivirajmo izraz (267), pa je — uzevši u obzir da P_{hKR} ne ovisi o P_i —

$$\frac{dK}{dW_h} = \frac{dK_h}{dW_h} - k_b = 0 \tag{274}$$

odnosno

$$k_b = \frac{dK_h}{dW_h} \tag{275}$$

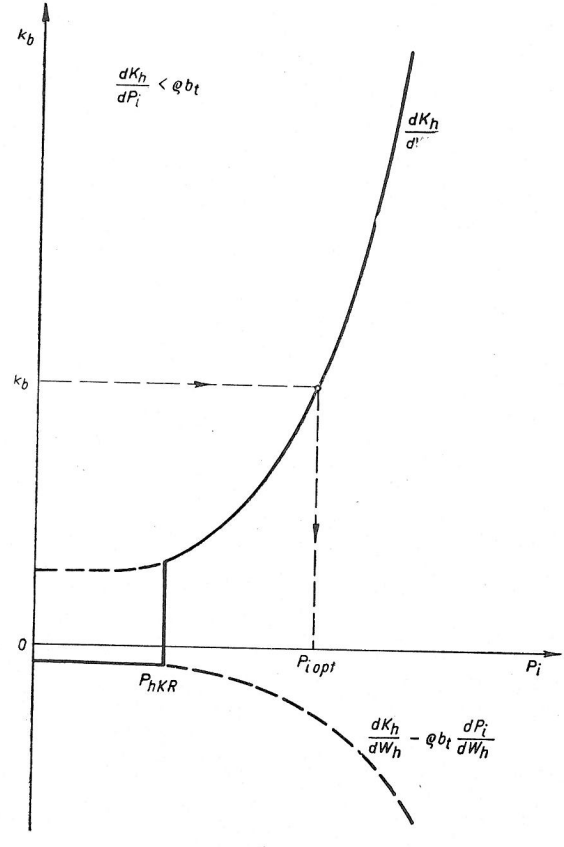
Budući da je u svim slučajevima druga derivacija pozitivna, postojat će uvijek i minimum funkcije (267).



Sl. 163. Potrebne krivulje za određivanje optimalne instalirane snage hidroelektrane za slučaj kad je $dK_h/dW_h > \varrho b_t$.

Za određivanje optimalne instalirane snage možemo se poslužiti grafičkom konstrukcijom. Kao osnova za to mogu poslužiti izrazi (271) i (275). Pretpostavimo da je krivulja trajanja snaga promatrane hidroelektrane prikazana na sl. 162, na kojoj je označena i veličina P_{hKR}. Na osnovu krivulje trajanja, te na osnovu ovisnosti godišnjih troškova hidroelektrane o instaliranoj snazi, koja se može odrediti

iz ovisnosti investicija o instaliranoj snazi, moguće je nacrtati krivulju na sl. 163 i 164, koja prikazuje ovisnost diferencijalnog kvocijenta dK_h/dW_h, što odgovara desnoj strani izraza (275). Uzevši u obzir veličine b_t i ϱ kao i diferencijalni kvocijent dP_i/dW_h možemo nacrtati i krivulju koja prikazuje desnu stranu izraza (271). Budući da (271) vrijedi za $P_i < P_{hKR}$, a (275) za $P_i > P_{hKR}$, krivulje na sl. 163 i 164 imaju značenje samo u odgovarajućim područjima (puno izvučeni dijelovi krivulja). Radi toga i postoji skok za vrijednost P_{hKR}. Na sl. 163 prikazan je slučaj kad je ispunjena nejednadžba (272), a na sl. 164 kad ta nejednadžba nije ispunjena. Pomoću tih krivulja može se za bilo koje specifične promjenljive troškove k_b odrediti optimalna instalirana snaga $P_{i\,opt}$



Sl. 164. Potrebne krivulje za određivanje optimalne instalirane snage hidroelektrane za slučaj kad je $dK_h/dW_h < \varrho b_t$.

promatrane hidroelektrane nanošenjem veličine k_b na ordinatu i određivanjem $P_{i\,opt}$, koji odgovara toj veličini k_b, kako bi se odredila snaga za koju je zadovoljena bilo jednadžba (271) bilo jednadžba (275).

Uspoređujući dijagrame na sl. 163 i 164 možemo konstatirati da za slučaj kad je $dK_h/dP_i > \varrho b_t$ optimalna instalirana snaga može biti i manja od P_{hKR}, dok za slučaj kad je $dK_h/dP_i < \varrho b_t$ optimalna instalirana snaga ne može biti manja od P_{hKR}.

Položaj hidroelektrane u dnevnom dijagramu opterećenja ovisi o njenoj raspoloživoj snazi i energiji. U sušnom razdoblju moguće je veći dio proizvodnje hidroelektrana koristiti za pokrivanje varijabilnog dijela dijagrama opterećenja, da bi se što više iskoristila njihova snaga. U tom razdoblju godine suma iskoristivih snaga hidroelektrana normalno je manja od sume maksimalnih snaga (poglavlje V 5). Povećanje instalirane snage hidroelektrana, radi prilagođavanja dijagramu opterećenja u sušnom razdoblju, dakle nema, opravdanja.

Nasuprot tome, u vlažnom razdoblju godine samo jedan dio hidroelektrana može raditi u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja, dok drugi dio hidroelektrana može koristiti svoju maksimalnu snagu samo kroz dio dana, jer se mora prilagoditi obliku dijagrama opterećenja. Te druge hidroelektrane ne mogu, dakle, proizvesti onu količinu energije koju bi mogle proizvesti svojom instaliranom snagom.

Ako, dakle, pretpostavimo da krivulja trajanja snaga prikazana na sl. 162 predstavlja krivulju trajanja uz pretpostavku da se snaga koristi kroz cijeli dan, te ako je na temelju te krivulje određena optimalna instalirana snaga hidroelektrane, ispunjen je uvjet minimuma troškova u sistemu, ako promatrana hidroelektrana stvarno radi s konstantnom snagom tokom cijelog dana. Prema tome krivulja trajanja snage prikazana na sl. 162 kao osnova za određivanje optimalne instalirane snage može se upotrijebiti ako se radi o protočnoj hidroelektrani ili o akumulacionoj hidroelektrani, koja će raditi i u vlažnom razdoblju cijeli dan s konstantnom snagom. Međutim, takvu ulogu ne mogu imati sve akumulacione hidroelektrane, pa je potrebno promotriti na koji se način može odrediti optimalna veličina izgradnje hidroelektrane, koja u vlažnom razdoblju treba da pokriva dio varijabilnog dijela dijagrama opterećenja. Kad se govori o vlažnom razdoblju, misli se na razdoblje velike proizvodnje hidroelektrana u sistemu kao cjelini, što se kod akumulacione hidroelektrane s velikom akumulacijom ne mora vremenski poklapati s velikom proizvodnjom u promatranoj hidroelektrani.

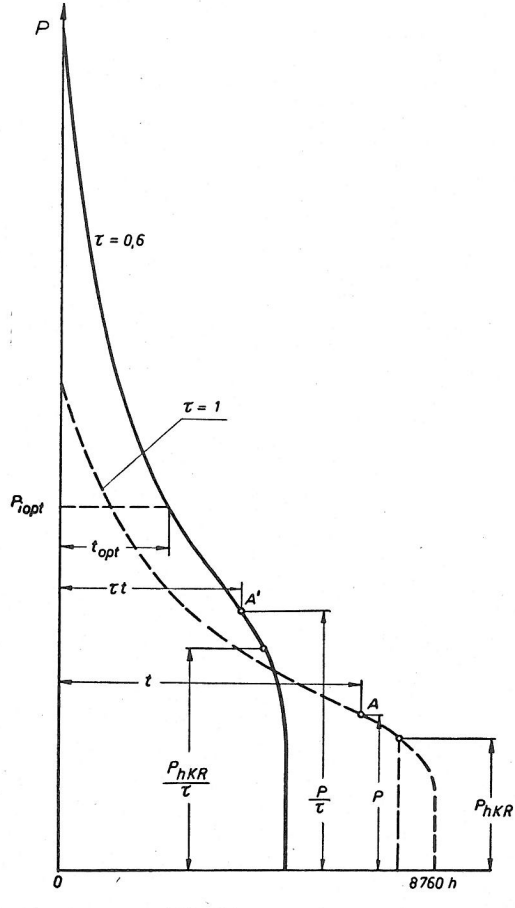
Pretpostavimo, dakle, da će promatrana hidroelektrana u vlažnom razdoblju koristiti vodu t_h sati u radnom danu. Ako uzmemo u obzir i neradne dane, relativno trajanje rada takve hidroelektrane određeno je relacijom

$$\tau = \frac{r t_h}{24\,(r+n)} \tag{276}$$

Pomoću veličine τ možemo iz krivulje trajanja prikazane na sl. 162, koja odgovara relativnom trajanju $\tau = 1$, odrediti novu krivulju trajanja snage, množenjem apscisa i dijeljenjem ordinata s τ. Takva konstrukcija nove krivulje trajanja je opravdana, jer se skraćuje vrijeme

trajanja korištenja snaga, pa je istodobno potrebno povećati snagu. Na sl. 165 prikazana je, pored osnovne krivulje za $\tau = 1$, i nova krivulja trajanja za $\tau = 0{,}6$. Polazeći od nove krivulje trajanja možemo odrediti vrijednosti desnih strana izraza (271) i (275), koji su prikazani na sl. 166. Sada određujemo optimalnu instaliranu snagu na isti način kao i za $\tau = 1$.

Pri zazmatranju krivulje trajanja za $\tau < 1$ i određivanju optimalne instalirane snage prema toj krivulji, ne treba zaboraviti da je za odre-



Sl. 165. Primjer krivulje trajanja snaga hidroelektrane uz relativno dnevno trajanje pogona $\tau = 0{,}6$.

đivanje instalirane snage važno trajanje pogona promatrane hidroelektrane samo u razdoblju velikih voda, tj. u trajanju t_{opt} (sl. 165), koje odgovara optimalnoj instaliranoj snazi. Sasvim je svejedno, s obzirom na određivanje optimalne instalirane snage, kako se u ostalim

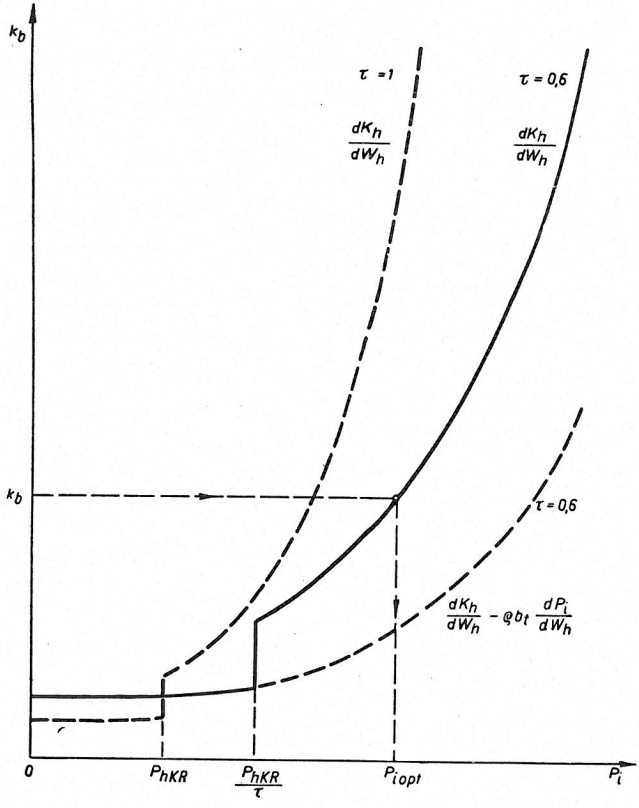
razdobljima koristi snaga hidroelektrane, jer su za određivanje optimuma mjerodavni prirasti troškova i proizvodnje.

Mjesto pomoću krivulja na sl. 163 i 164, optimalnu veličinu izgradnje možemo odrediti i neposredno pomoću krivulje trajanja opterećenja. Dijeljenjem brojnika i nazivnika s dP_i na desnim stranama izraza (271) i (275) dolazimo do relacija

$$\frac{dW_h}{dP_i} = \frac{1}{k_b}\left(\frac{dK_h}{dP_i} - \varrho\, b_t\right) \tag{277}$$

i

$$\frac{dW_h}{dP_i} = \frac{1}{k_b}\,\frac{dK_h}{dP_i} \tag{278}$$



Sl. 166. Potrebne krivulje za određivanje optimalne instalirane snage hidroelektrane kad je $dK_h/dW_h > \varrho b_t$ i $\tau = 0{,}6$.

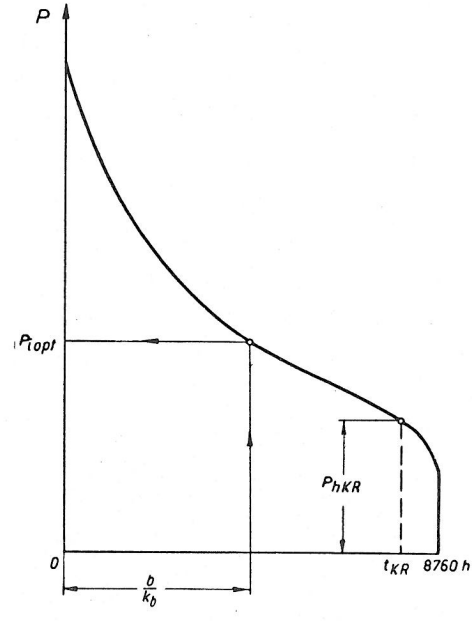
Diferencijalni kvocijent dW_h/dP_i predstavlja trajanje t na krivulji trajanja (sl. 162), dok je diferencijalni kvocijent dK_h/dP_i jednak dodatnim specifičnim troškovima b hidroelektrane, koji se mogu odrediti množenjem dodatnih specifičnih investicija B po jedinici snage (241) kvotom

godišnjih troškova. Prema tome, relacije (277) i (278) možemo pisati i u obliku

$$t_1 = \frac{b - \varrho\, b_t}{k_b} \tag{279}$$

$$t_2 = \frac{b}{k_b} \tag{280}$$

Ako, dakle, u dijagramu, koji prikazuje krivulju trajanja snaga promatrane hidroelektrane, na apscisu nanesemo vrijednost desne strane izraza (279) i (280), moći ćemo iz krivulje trajanja očitati optimalnu instaliranu snagu hidroelektrane (sl. 167). Na sl. 167 označeno je i



Sl. 167. Primjer određivanja optimalne instalirane snage hidroelektrane pomoću krivulje trajanja snaga b dodatni specifični troškovi hidroelektrane po kW, k_b specifični promjenljivi troškovi u termoelektranama po kWh.

trajanje t_{KR}, koje odgovara trajanju snage u kritičnom razdoblju. Međutim, postavlja se pitanje kad treba upotrijebiti izraz (279), a kada (280). Naravno da i sada treba uzeti u obzir nejednadžbe (272) i (273), koje možemo napisati — uzevši u obzir vrijednost diferencijalnog kvocijenta dK_h/dP_i — u obliku

$$b > \varrho\, b_t \tag{281}$$

$$b < \varrho\, b_t \tag{282}$$

Na osnovu ranijih izlaganja, te prikaza na sl. 163 i 164 može se zaključiti da je u svim slučajevima, kad je

$$t \leqq t_{KR} \tag{283}$$

za određivanje optimalne instalirane snage mjerodavna relacija (280), bez obzira da li je ispunjena nejednadžba (281) ili (282). Međutim, za slučajeve kad nije ispunjena relacija (283) treba uzeti u obzir nejednadžbe (281) i (282). Ako je ispunjena nejednadžba (281). što odgovara prikazu na sl. 164, treba razlikovati dva slučaja: prvi, kad je $t_1 < t_{KR}$, jer je tada $t_{opt} = t_{KR}$, i drugi, kad je $t_1 > t_{KR}$, jer je tada mjerodavna relacija (279). Međutim, ako je ispunjena nejednadžba (282), a za slučajeve kad nije ispunjena relacija (283), $t_{opt} = t_{KR}$.

b) Napomene uz određivanje optimalne instalirane snage

α) *Međusobni odnos snage P_{io} (sl. 153) i optimalne instalirane snage $P_{i\,\mathrm{opt}}$*

Usporedba optimalne instalirane snage hidroelektrane $P_{i\,opt}$ s instaliranom snagom P_{io} (sl. 153), uz koju se postižu minimalne specifične investicije, odnosno minimalni specifični troškovi k_h po kWh, daje uvid u međusobne odnose tih dviju instaliranih snaga. Specifični troškovi za proizvodnju energije iz hidroelektrane definirani su relacijom

$$k_h = \frac{K_h}{W_h} \tag{284}$$

pa je minimum specifičnih troškova postignut kad je

$$\frac{K_h}{W_h} = \frac{dK_h}{dW_h} \tag{284 a}$$

Budući da omjer K_h/W_h predstavlja sada minimalne specifične troškove $k_{h\,\min}$, znači da će se krivulje $k_h = f(P_i)$ i $dK_h/dW_h = f(P_i)$ sjeći u tački koja odgovara snazi P_{io} (sl. 168). Prema tome, kad je $k_b = k_{h\,\min}$, optimalna instalirana snaga $P_{i\,opt}$ bit će jednaka instaliranoj snazi P_{io}, dakle, za istu snagu bit će postignut i optimum u elektroenergetskom sistemu i optimum u promatranoj hidroelektrani, jer će za istu snagu biti postignuti minimalni specifični troškovi po kWh u elektroenergetskom sistemu kao cjelini i u promatranoj hidroelektrani. Za slučajeve kad su minimalni specifični troškovi u promatranoj hidroelektrani $k_{h\,\min}$ različiti od specifičnih promjenljivih troškova u termoelektranama k_b, razlikovat će se i $P_{i\,opt}$ od P_{io}. Tako (sl. 168) za $k_{h\,\min} < k_b$ imamo $P_{i\,opt} > P_{io}$, a za $k_{h\,\min} > k_b$ imamo $P_{i\,opt} < P_{io}$.

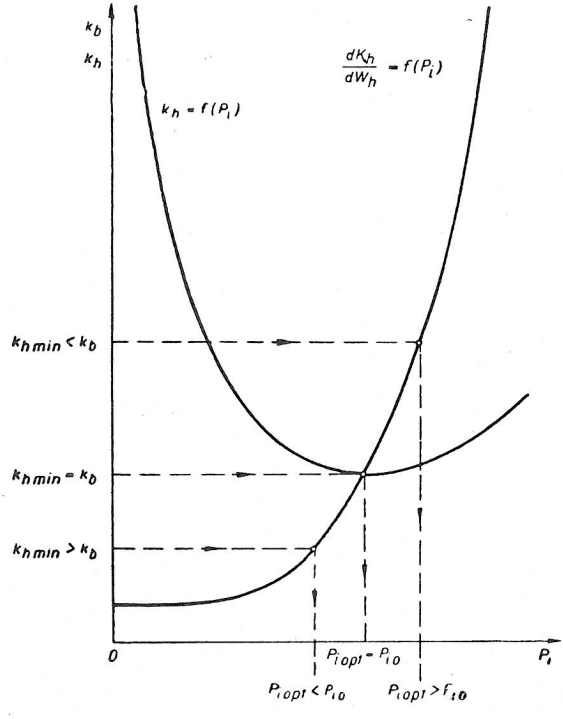
β) *Instalirana snaga i uloga hidroelektrana*

Optimalna instalirana snaga hidroelektrane ovisna je o njezinoj ulozi u pokrivanju dijagrama opterećenja, odnosno o relativnom vre-

menu τ (276). Kako je već spomenuto, vlažno razdoblje u elektroenergetskom sistemu je mjerodavno za određivanje veličine τ, jer je u tom razdoblju, za iskorištenje raspoložive količine vode, potrebna najveća snaga hidroelektrana.

Položaj protočnih hidroelektrana u dijagramu opterećenja unaprijed je određen, pa je za takvu vrstu hidroelektrana relativno vrijeme $\tau = 1$.

Veliki akumulacioni bazeni omogućuju velike protoke u sušnom razdoblju, pa se na taj način znatno povećava snaga P_{hKR} u kritičnom razdoblju. Na sl. 169 prikazan je znatno pojednostavljeni dijagram

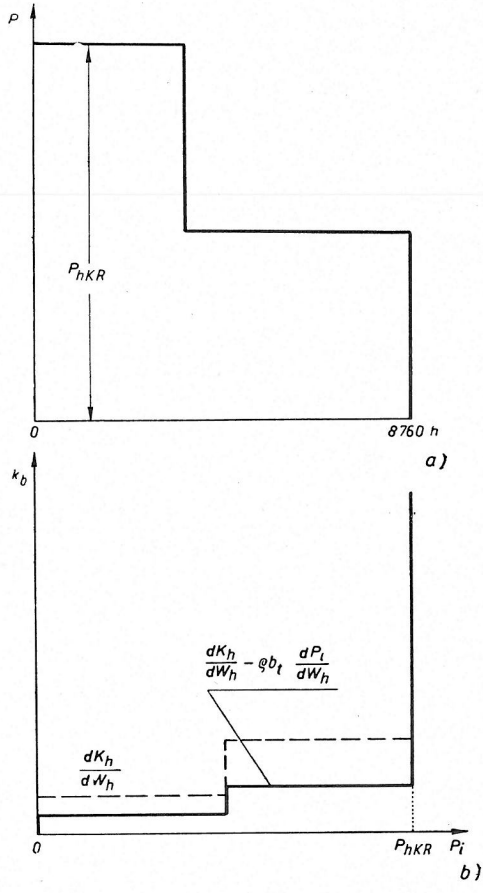


Sl. 168. Međusobni odnos instalirane snage hidroelektrane P_{i0}, uz koju se postižu najniži specifični troškovi proizvodnje u hidroelektrani, i optimalne instalirane snage P_{iopt} hidroelektrane.

trajanja snaga hidroelektrane koja koristi veliki akumulacioni bazen. U elektroenergetskom sistemu s nešto većim udjelom hidroenergije u ukupnoj proizvodnji, u kritičnom razdoblju se može računati s $\tau = 1$ ili blizu toj vrijednosti, pa će $P_{i\,opt}$ biti jednako P_{hKR}, ako b u usporedbi s ϱb_t nije suviše velik. Naravno da u sistemima s malim udjelom hidroenergije treba odrediti položaj takve hidroelektrane u

dijagramu opterećenja, pa na temelju toga i odabrati veličinu τ, prema kojoj treba odrediti optimalnu instaliranu snagu. Za takve hidroelektrane veličina τ ovisi o prilikama u kritičnom razdoblju.

Za hidroelektrane s relativno malim akumulacijama, veličina τ ovisi o prilikama u vlažnom razdoblju, a na izbor te veličine u prvom redu utječu dodatne specifične investicije B, odnosno dodatni speci-



Sl. 169. Pojednostavnjena krivulja trajanja snaga hidroelektrane s velikom snagom P_{hKR} i potrebne krivulje za određivanje optimalne instalirane snage.

fični troškovi b po jedinici snage. Normalno, za manji τ dobivamo veću optimalnu veličinu izgradnje. Prema prilikama u sistemu (oblik dijagrama opterećenja, udio hidroenergije u ukupnoj proizvodnji) ovisit će veličina τ, pa će neke hidroelektrane trebati izgraditi za $\tau = 1$, a neke za manje vrijednosti τ, odnosno za niz manjih vrijednosti τ. Mi, dakle, hoćemo

da hidroelektrane izgradimo za određenu ulogu u pokrivanju dijagrama opterećenja, ali pri tome želimo da zadovoljimo potrebe uz što manje troškove. Na osnovu svega toga možemo zaključiti da će biti povoljnije da za rad s malim τ predvidimo one hidroelektrane koje imaju male dodatne specifične investicije B, dakle, hidroelektrane s velikim padom i kratkim dovodom (sl. 158 i 159), dok za rad s $\tau = 1$ treba predvidjeti hidroelektrane s vrlo malim padom, odnosno hidroelektrane sa srednjim padom i dugim dovodom.

Koje i koliko hidroelektrana treba izgraditi s većom instaliranom snagom od one koja je optimalna uz $\tau = 1$, moguće je odrediti tek nakon detaljnije analize prilika u elektroenergetskom sistemu, uzevši u obzir i već izgrađene hidroelektrane, i usporedbe hidroelektrana koje dolaze u obzir za izgradnju na promatranom području.

γ) *Prilike nakon iscrpljenja iskoristivih vodnih snaga*

Nakon potpunog iscrpljenja ili nakon iscrpljena većeg dijela ekonomski iskoristivih vodnih snaga, novu proizvodnju energije treba da na sebe preuzmu termoelektrane (bilo klasične bilo nuklearne). Od tada će hidroelektrane sve više preuzimati zadaću da pokrivaju sve viši dio dijagrama opterećenja. Prema tome, uzevši u obzir to buduće stanje, bilo bi korisno hidroelektrane instalirati za još veću snagu od one koja odgovara prilikama kad još ima raspoloživih neizgrađenih hidroenergetskih izvora.

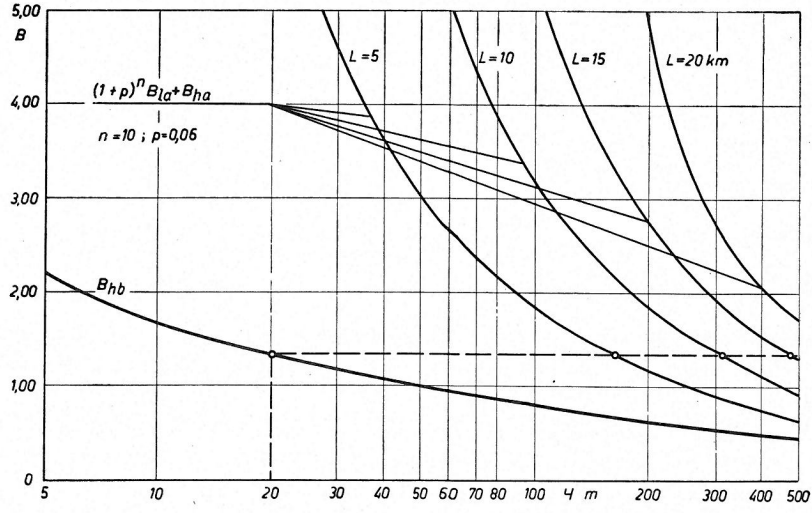
Ako je predvidivo vremensko razdoblje do iscrpljenja vodnih snaga dulje od vijeka trajanja postrojenja, ne bi trebalo voditi računa o prilikama u toj relativno dalekoj budućnosti. Međutim, ako je to vremensko razdoblje kraće, a pogotovo kad je to razdoblje kratko, korisno je pri izboru instalirane snage (određivanje veličine τ) voditi računa o toj činjenici.

U pribranskim hidroelektranama možemo normalno, s malim povećanjem investicija u vrijeme građenja, osigurati mogućnost postavljanja još jednog ili više agregata. Postavljanje tih dodatnih agregata bit će izvršeno kad bude — s obzirom na položaj hidroelektrane u dijagramu opterećenja — potrebno. Može se, dakle, tvrditi, da ima opravdanja da se u pribranskim hidroelektranama predvidi mogućnost kasnijeg postavljanja daljnjih agregata.

Za hidroelektrane s dovodom to nije moguće unaprijed reći. Za buduće povećanje broja agregata, odnosno za povećanje instalirane snage u budućnosti u takvoj hidroelektrani, potrebno je već u vrijeme gradnje predvidjeti dovodne organe (ulazni uređaj, tunel, vodna komora) za konačnu instaliranu snagu. To svakako predstavlja preuranjene investicije. U nekim slučajevima, međutim, te preuranjene investicije mogu biti opravdane.

Pretpostavimo da smo odredili, da će za n godina biti potrebno ugraditi dodatnu snagu u nekoj hidroelektrani. Treba odlučiti da li će se u hidroelektrani (a) s dovodom duljine L, koja će se danas graditi,

predvidjeti povećanje instalirane snage nakon n godina, ili će se za povećanje instalirane snage koristiti mjesto u pribranskoj hidroelektrani (b), koja je već izgrađena. Za svaki kW povećanja instalirane snage u hidroelektrani (a) treba danas investirati B_{la}, a u n-toj godini B_{ha} (poglavlje IX 1b), dakle, preračunato na današnju vrijednost ukupne dodatne specifične investicije iznose



170. Usporedba dodatnih specifičnih investicija za hidroelektranu s dovodom, koji je izgrađen prije nego što je potrebna dodatna snaga, i pribranske hidroelektrane — relacija (287).

$$B_a = B_{la} + \frac{B_{ha}}{(1+p)^n} \tag{285}$$

gdje je p kamatnjak u % podijeljen sa 100. U pribranskoj hidroelektrani (b) za povećanje instalirane snage za svaki kW potrebno je u n-toj godini investirati B_{hb}, što preračunato na današnju vrijednost iznosi

$$B_b = \frac{B_{hb}}{(1+p)^n} \tag{286}$$

Ako je $B_a < B_b$, odnosno ako je

$$(1+p)^n B_{la} + B_{ha} < B_{l.b} \tag{287}$$

ima opravdanja prijevremeno ulaganje u povećani dovod hidroelektrane (a). Radi ilustracije relacije (287) na sl. 170 je prikazana lijeva i desna strana nejednadžbe (287) u ovisnosti o padu H i za različite duljine

dovoda L. Dijagram na sl. 170 nacrtan je na osnovu podataka na sl. 159, a za $n = 10$ godina i $p = 0{,}06$. Uspoređujući pribransku hidroelektranu s padom $H = 20$ m i hidroelektranu s dovodom duljine $L = 10$ km, vidjet ćemo (sl. 170) da je povoljnije postaviti dodatne agregate u pribranskoj hidroelektrani nego u hidroelektrani s dovodom, ako je pad u njoj manji od 310 m. Za hidroelektrane s dovodom duljine 5 km taj granični pad iznosi 170 m, a za hidroelektranu s dovodom duljine 15 km iznosi 480 m.

Mogućnost izgradnje novih pribranskih hidroelektrana s većim padovima, odnosno mogućnost postavljanja dodatnih agregata u već izgrađenim pribranskim hidroelektranama s većim padovima, manje opravdava prijevremeno investiranje u dovode, i to tim manje što je potreba za novom snagom dalja od momenta izgradnje, što je pad manji i što je duljina dovoda veća.

U elektroenergetskim sistemima s velikim iskoristivim vodnim snagama, koje su još daleko od iscrpljenja, nema ekonomskog opravdanja prijevremene investicije u dulje dovode samo radi zadovoljenja potreba u budućnosti. U tim sistemima je povoljnije predvidjeti mogućnost povećanja instalirane snage u pribranskim hidroelektranama, pa makar i u pribranskim hidroelektranama s malim padom.

S druge strane, u sistemima koji se nalaze pred potpunim iskorištenjem vodnih snaga, treba detaljnije razmotriti prilike, te na osnovu detaljne analize donijeti odluku koje hidroelektrane s dovodom treba izgraditi tako da se omogući povećanje instalirane snage u budućnosti. Odluka ovisi o padu i duljini dovoda hidroelektrana s dovodom, te o padovima pribranskih hidroelektrana, koje se još mogu izgraditi, odnosno u kojima se može povećati instalirana snaga.

3. Određivanje optimalnog volumena akumulacionog bazena

a) Općenito

I sada, kao i pri određivanju optimalne instalirane snage hidroelektrane, polazimo od zahtjeva da opskrbimo potrošače električnom energijom uz što manje troškove. I sada polazimo od postojećeg stanja u elektroenergetskom sistemu, u kojem već postoje izgrađene hidroelektrane i termoelektrane, pa pretpostavimo da treba izgraditi novu akumulacionu hidroelektranu. Postoje topografski i geološki uvjeti da se ostvari akumulacioni bazen, pa se postavlja pitanje koliki je volumen toga akumulacionog bazena optimalan.

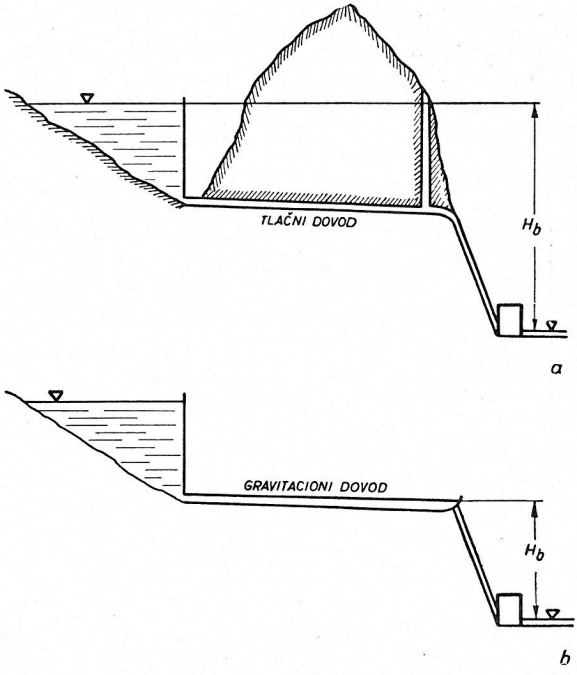
Upotrijebivši oznake u odjeljku 2a ovoga poglavlja, možemo za ukupne troškove u elektroenergetskom sistemu postaviti istu jednadžbu kao (267), u koju su uključeni troškovi i za postojeće i za novu promatranu hidroelektranu. U tom izrazu članove možemo podijeliti u dvije grupe: u prvoj su, članovi koji ne ovise o novoj hidroelektrani,

pa prema tome, ni o volumenu akumulacije; u drugoj, članovi koji su ovisni o volumenu akumulacije promatrane hidroelektrane. Uzevši u obzir tu podjelu, jednadžbu (267) možemo pisati u obliku

$$K = [K_{ho} + \varrho\, b_t\, P_{to} + k_b\,(W - W_{ho})] + K_h - \varrho\, b_t\, P_{hKR} - k_b\, W_h \qquad (288)$$

Članovi u uglatoj zagradi spadaju u prvu grupu, pa ih možemo zamijeniti s konstantom K_o, koja nema utjecaja na daljnja razmatranja, pa konačno imamo

$$K = K_o + K_h - \varrho\, b_t\, P_{hKR} - k_b\, W_h \qquad (289)$$



Sl. 171. Shema hidroelektrane s tlačnim dovodom (*a*) i hidroelektrane s gravitacionim dovodom (*b*).

Taj izraz — kako ćemo vidjeti — može poslužiti kao osnova za određivanje optimalnog volumena akumulacije.

Za određivanje optimalnog volumena akumulacije potrebno je, osim toga, razlikovati korisni volumen (A_k) i geometrijski volumen (A_g) akumulacije. Korisni i geometrijski volumen akumulacije definirani su u poglavlju II 1. Pored toga, treba razlikovati akumulacionu hidroelektranu s tlačnim (sl. 171 a) od hidroelektrane s gravitacionim

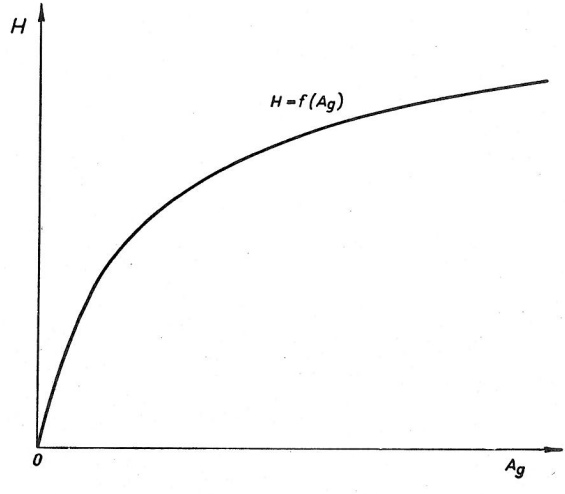
dovodom (sl. 171 b), jer u prvom slučaju stanje u akumulacionom bazenu ima utjecaja na neto pad u hidroelektrani, dok u drugom slučaju taj utjecaj ne postoji.

b) Optimalni volumen akumulacije za hidroelektranu s tlačnim vodom

Investicje za hidroelektranu možemo prema (241) podijeliti u dva dijela. Analogno tome možemo i godišnje troškove prikazati izrazom

$$K_h = a + bP_i \tag{290}$$

uvaživši kvote godišnjih troškova, kojima treba množiti veličine A i B da se dođe do veličina a i b. Pri razmatranju instalirane snage računali smo da su A i B odnosno a i b konstante, što se ne smije pretpostaviti



Sl. 172. Primjer ovisnosti nivoa vode H u akumulacionom bazenu o geometrijskom volumenu akumulacije A_g.

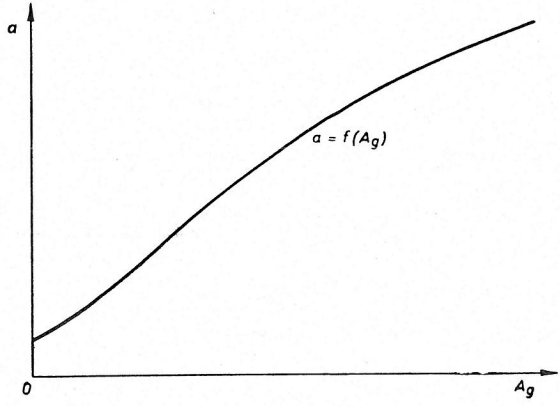
prilikom određivanja volumena akumulacije, jer obje veličine ovise o volumenu akumulacije, dok su neovisne ili praktički neovisne o instaliranoj snazi.

Prvi član na desnoj strani izraza (290) ovisi — osim o topografskim, geološkim i ostalim uvjetima — i o visini brane. Za određeni profil vodotoka visinom brane definiran je geometrijski volumen akumulacije. Na sl. 172 prikazan je primjer ovisnosti maksimalnog nivoa vode u akumulacionom bazenu o geometrijskom volumenu

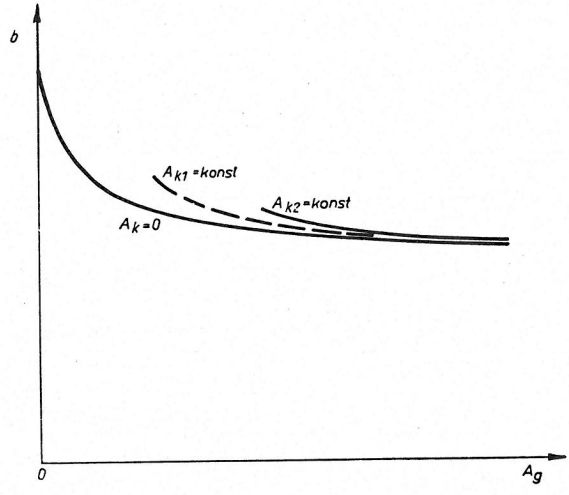
akumulacije. Na veličinu a nema, međutim, utjecaja korisni volumen akumulacije, jer je s obzirom na troškove svejedno da li se za reguliranje protoka koristi veći ili manji volumen akumulacije. Prema tome je

$$a = f(A_g) \tag{291}$$

a primjer za tok te funkcije prikazan je na sl. 173.



Sl. 173. Primjer ovisnosti godišnjih troškova a u hidroelektrani, koji ne ovise o instaliranoj snazi, o geometrijskom volumenu akumulacije A_g.



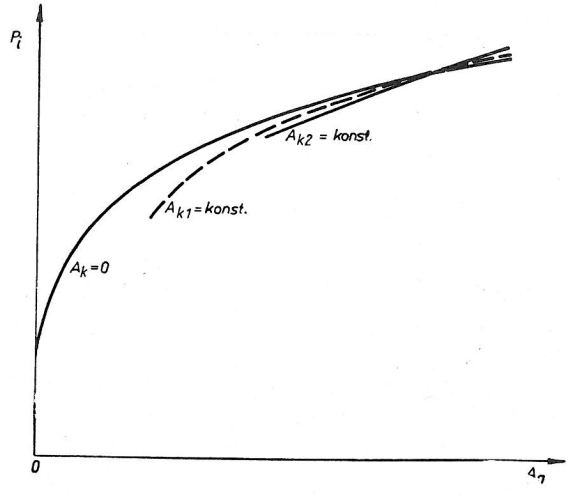
Sl. 174. Primjer ovisnosti dodatnih specifičnih troškova b po kW u hidroelektrani o geometrijskom volumenu akumulacije Ag za različite korisne volumene akumulacije A_k.

Dodatni specifični troškovi po jedinici snage b za promatranu hidroelektranu ovisni su i o geometrijskom i o korisnom volumenu akumulacije. Veličina b je, naime, ovisna o padu, a mjerodavni pad za koji se konstruira turbina ovisi i o geometrijskom i o korisnom volumenu akumulacije. Ako, na primjer, računamo da je korisni volumen akumulacije konstantan, a da povećavamo geometrijski volumen akumulacije, povećat će se i maksimalni pad i pad mjerodavan za konstrukciju turbina. To povećanje pada — uzevši u obzir izloženo u odjeljku 1a ovog poglavlja — izazvat će smanjenje dodatnih specifičnih troškova b. Pri tome svakako treba uzeti u obzir i utjecaj povećanja tlaka u tunelu. Prema tome je

$$b = f(A_g, A_k) \tag{292}$$

Primjer za tok funkcije b prikazan je na sl. 174 za nekoliko korisnih volumena A_k.

Pomoću dodatnih specifičnih troškova b, na način opisan u odjeljku 2a ovog poglavlja, a uzevši u obzir oblik krivulje trajanja,



Sl. 175. Primjer ovisnosti instalirane snage P_i hidroelektrane o geometrijskom volumenu akumulacije Ag za različite korisne volumene akumulacije A_k.

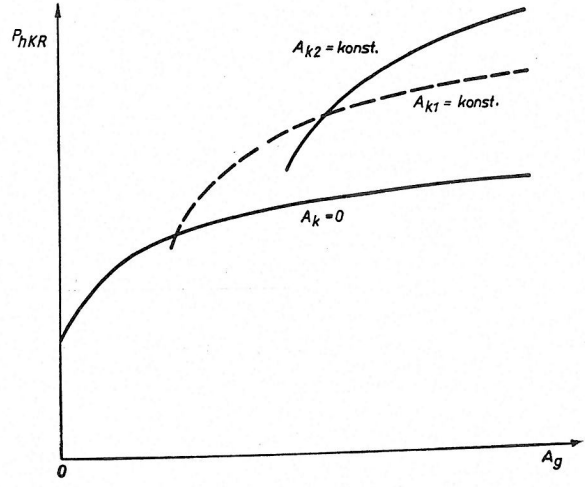
određuje se optimalna instalirana snaga. Pri tome treba, naravno, uzeti u obzir promjenu krivulje trajanja radi korištenja akumulacionog bazena. Instalirana snaga nije ovisna o korisnom i geometrijskom volumenu akumulacije samo radi utjecaja tih veličina na b, nego i radi toga što i korisni i geometrijski volumen utječu na pad u hidroelektrani.

Na sl. 175 prikazan je primjer ovisnosti

$$P_i = f(A_g, A_k) \tag{292}$$

pri čemu treba naglasiti da oblik krivulje trajanja ima veliki utjecaj na veličinu instalirane snage.

Snaga hidroelektrane u kritičnom razdoblju P_{hKR} ovisi o reguliranom dotoku u turbine i o padu na kojem se koristi taj dotok. Dotok u turbine ovisi samo o korisnom volumenu akumulacije, a pad u kritičnom razdoblju o korisnom i geometrijskom volumenu akumulacije. Naime, uz isti geometrijski volumen akumulacije s povećanjem korisnog



Sl. 176. Primjer ovisnosti snage P_{hKR} hidroelektrane u kritičnom razdoblju o geometrijskom volumenu akumulacije A_g za različite korisne volumene akumulacije A_k.

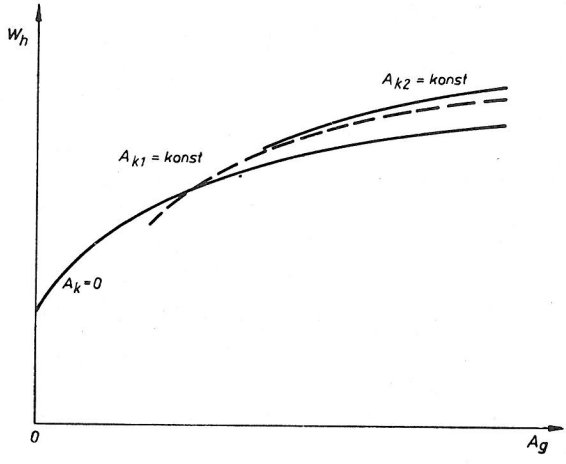
volumena smanjuje se pad u kritičnom razdoblju, pa se i pored povećanja dotoka može dogoditi da snaga u kritičnom razdoblju postane manja (sl. 176). To se događa za manje geometrijske volumene akumulacije. Naravno da snaga P_{hKR} ovisi i o obliku krivulje trajanja protoka, te i o obliku krivulje $H = f(A_k)$ (sl. 172). Zbog svega toga i vrijedi da je

$$P_{hKR} = f(A_g, A_k) \tag{293}$$

Za moguću proizvodnju promatrane hidroelektrane (sl. 177) vrijedi da je

$$W_h = f(A_g, A_k) \tag{294}$$

S povećanjem geometrijskog volumena akumulacije povećava se i moguća proizvodnja hidroelektrane, jer se — radi smanjenja dodatnih specifičnih investicija — povećava veličina izgradnje, a s tim i volumen iskorištene vode, i jer se povećava pad uz konstantni korisni volumen akumulacije. S povećanjem korisnog volumena akumulacije, a za isti geometrijski volumen, može moguća proizvodnja postati manja zbog smanjenja pada.



Sl. 177. Primjer ovisnosti moguće proizvodnje W_h hidroelektrane o geometrijskom volumenu akumulacije A_g za različite korisne volumene akumulacije A_k.

Treba naglasiti da ovisnosti prikazane na sl. 172—177 treba da posluže samo kao ilustracija izlaganja, jer vrijede samo za promatranu hidroelektranu.

Prema izloženom možemo postaviti da su ukupni troškovi u sistemu

$$K=f(A_g, A_k) \tag{295 a}$$

pa poznavajući ranije navedene ovisnosti mogu se odrediti ukupni troškovi u sistemu kao funkcija geometrijskog volumena akumulacije s korisnim volumenom kao parametrom, te na osnovu takve familije krivulja odrediti i optimalni geometrijski i optimalni korisni volumen akumulacije.

Prilikom određivanja optimalnog volumena akumulacije treba uzeti u račun i utjecaj akumulacije na nizvodne hidroelektrane. Pri tome treba naglasiti da na nizvodne hidroelektrane ima utjecaja samo korisni volumen akumulacije. Taj volumen akumulacije, naravno, može utjecati još samo na instaliranu snagu neizgrađenih nizvodnih

hidroelektrana, a utječe na povišenje snaga P_{hKR} i na povećanje (ako i bez te akumulacije nije već iskorištena sva količina vode) moguće proizvodnje W_h.

U nekim slučajevima shemom iskorištenja vodotoka određena je visina brana, a prema tome i geometrijski volumen akumulacije, pa prilikom projektiranja promatrane hidroelektrane treba odrediti samo korisni volumen akumulacije. To se može postići opet pomoću izraza (289), ali tražeći sada ovisnost svih veličina o A_k, jer je geometrijski volumen akumulacije već unaprijed zadan. Treba napomenuti da je veličina a, koja dolazi u izrazu za K_h (290) sada konstanta. Minimumom troškova

$$K = f(A_k) \tag{295 b}$$

bit će određen optimalni korisni volumen akumulacije.

c) Optimalni volumen akumulacije za hidroelektranu s gravitacionim dovodom

Za hidroelektranu s gravitacionim dovodom ne treba razlikovati korisni od geometrijskog volumena akumulacije, već treba postaviti da je $A_g = A_k$. U slučaju gravitacionog dovoda, naime, nivo vode u akumulacionom bazenu nema nikakvog utjecaja na pad u hidroelektrani, pa ne može biti nikakve koristi od nekorištenja ukupnog volumena akumulirane vode. Nekorištenje dijela akumulirane vode dovodilo bi, naime, samo do smanjenja snage P_{hKR} i moguće proizvodnje W_h.

Prema tome možemo postaviti da je

$$K = f(A_g) \tag{296}$$

a optimalni volumen određujemo i sada pomoću relacije (289). Pri tome treba naglasiti da su sada specifični dodatni troškovi b konstantna veličina, pa instalirana snaga ovisi o obliku krivulje trajanja snaga. Snaga P_{hKR} je proporcionalna s dotokom u turbine u kritičnom razdoblju, dok je moguća proizvodnja W_h proporcionalna s iskoristivim volumenom vode u hidroelektrani.

U nizvodnim hidroelektranama imamo iste prilike kao i kod hidroelektrana s tlačnim dovodom, jer na njih utječe samo korisni volumen akumulacije.

DESETO POGLAVLJE

VRIJEDNOST GUBITAKA U PRIJENOSU I TRANSFORMACIJI

1. Gubici snage i energije

Gubitak snage u vodu možemo prikazati izrazom

$$\Delta P_m = F \frac{P^2_m}{q} \tag{297}$$

gdje je F konstanta ovisna o duljini voda (l), o vodljivosti materijala vodiča (λ), o naponu na kraju voda (U_2) i o faktoru snage na kraju voda ($\cos\varphi_2$), dok je P_m maksimalno djelatno opterećenje na kraju voda, a q presjek vodiča voda.

Za vodove male duljine, kad možemo zanemariti utjecaj kapaciteta voda, veličina F ima vrijednost

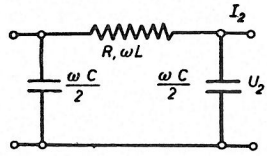
$$F = \frac{l}{\lambda U_2^2 \cos^2 \varphi_2} \tag{298}$$

Za dulje vodove, kad možemo s dovoljnom tačnošću upotrijebiti π-shemu (sl. 178), u kojoj u poprečnim granama imamo polovinu kapaciteta voda, konstantu F možemo odrediti, također, pomoću izraza (298), ali sada $\cos\varphi_2$ ne predstavlja faktor snage potrošača, već faktor snage na kraju voda prije poprečne grane. Taj novi faktor snage možemo odrediti iz izraza

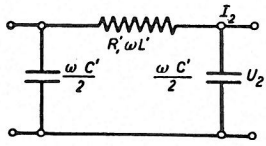
$$\cos\varphi'_2 = \frac{P_m}{\sqrt{P^2_m + \left(Q_m - U_2^2 \frac{\omega C}{2}\right)^2}} \tag{299}$$

gdje je C kapacitet voda određen iz produkta lC_1, u kojem je l duljina voda, a C_1 kapacitet po jedinici duljine, ω kružna frekvencija, dok je Q_m opterećenje jalovom snagom pri opterećenju P_m.

Za vrlo duge vodove ne se može upotrijebiti ista π-shema kao u slučaju duljih vodova (sl. 178), kada se konstante voda (R, L i C) određuju kao produkti konstanta voda po jedinici duljine (R_1, L_1 i C_1) i ukupne



a) dugi vod



b) vrlo dugi vod

$$R' + j\omega L' = (R + j\omega L)\frac{\operatorname{sh}\Theta}{\Theta}$$

$$C' = C\frac{th\frac{\Theta}{2}}{\frac{\Theta}{2}}$$

Sl. 178. Nadomjesne sheme dugih vodova

duljine voda. Za vrlo duge vodove, međutim, nadoknadnu uzdužnu impedanciju u shemi na sl. 178 određujemo iz izraza

$$R' + j\omega L' = (R + j\omega L)\frac{\operatorname{sh}\Theta}{\Theta} \tag{300}$$

dok je nadoknadna kapacitivna vodljivost

$$\omega C' = \omega C\frac{th\frac{\Theta}{2}}{\frac{\Theta}{2}} \tag{301}$$

U (300) i (301) je

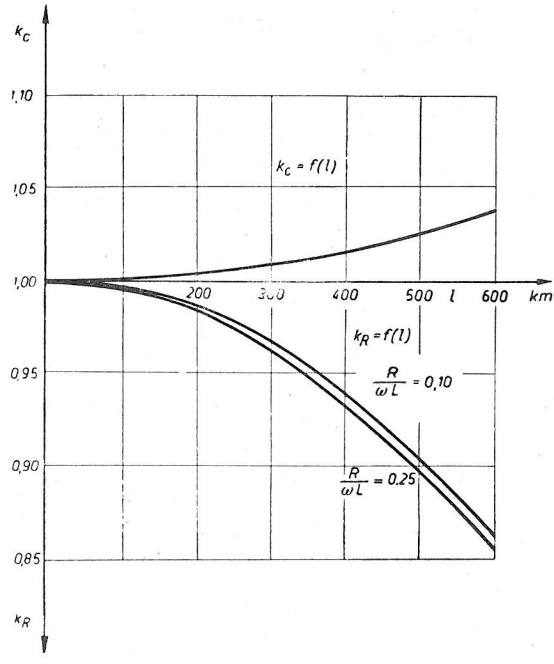
$$\Theta = \sqrt{j\omega C(R + j\omega L)} \tag{302}$$

Realni dio izraza (300) predstavlja djelatni otpor R', koji je mjerodavan za određivanje gubitaka u vodu. Može se postaviti da je

$$R' = k_R R \tag{303}$$

gdje je veličina k_R praktički funkcija samo duljine voda, jer se za zračne vodove može postaviti da je

$$\frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \text{konst.} \tag{304}$$



Sl. 179. Ovisnost veličina k_R (303) i k_C (305) o duljini dalekovoda

dok je utjecaj omjera $R/\omega L$ neznatan, kao što se vidi iz dijagrama na sl. 179, na kojoj je prikazana veličina $k_R = f(l)$ za $R/\omega L = 0{,}10$ i $R/\omega L = 0{,}25$ unutar kojih granica varira taj omjer.

Nadoknadni kapacitet C' možemo prikazati relacijom

$$C' = k_c C \tag{305}$$

Za k_c opet vrijedi da je ovisan praktički samo o duljini voda, jer je sada utjecaj omjera $R/\omega L$ još manji nego u slučaju veličine k_R.

Za vrlo duge vodove gubitak snage određujemo iz izraza (297), ali sada veličina F ima vrijednost

$$F = \frac{k_R\, l}{\lambda\, U_2^2 \cos^2 \varphi''_2} \tag{306}$$

u kojoj je faktor snage definiran izrazom

$$\cos \varphi''_2 = \frac{P_m}{\sqrt{P_m^2 + \left(Q_m - k_c \frac{\omega C}{2}\right)^2}} \tag{307}$$

Gubitak energije tokom vremena t_o (sati) određuje se iz izraza

$$\Delta W = \delta \Delta P_m t_o \tag{308}$$

gdje je δ faktor gubitaka, koji se — ako nije poznata krivulja trajanja opterećenja prema kojoj se može odrediti i krivulja trajanja gubitaka — aproksimativno određuje pomoću faktora opterećenja

$$m = \frac{W}{P_m t_o} \tag{309}$$

npr. prema [32] formuli

$$\delta = 0{,}7\, m^2 + 0{,}3\, m \tag{310}$$

ili prema formulama koje bolje odgovaraju karakteristikama opterećenja [32].

2. Utjecaj gubitaka na prilike u elektroenergetskom sistemu

Kako smo već spomenuli (poglavlje VI 1) dopunsku snagu i energiju za zadovoljenje potreba u kritičnom razdoblju racionalnije je ostvariti izgradnjom termoelektrana, jer se za dopunu može koristiti puna snaga i maksimalna mogućnost proizvodnje dopunske termoelektrane. To se ne može ostvariti u slučaju dopune hidroelektranom, budući da je njena moguća proizvodnja ovisna o raspoloživoj količini vode, koja je normalno mala u kritičnom razdoblju, pa bi znatan dio proizvodnog kapaciteta hidroelektrane u kritičnom razdoblju ostao neiskorišten. Zbog toga bi, za postizavanje iste proizvodnje u kritičnom razdoblju, trebalo u slučaju izgradnje hidroelektrana utrošiti znatno veća investiciona sredstva.

Povećane potrebe u kritičnom razdoblju treba, dakle, pokriti povećanjem izgradnje termoelektrana, pa prema tome i povećanje gubitaka treba nadoknaditi povećanjem izgradnje termoelektrana i povećanjem proizvodnje u termoelektranama.

S druge strane, povećanje potreba odnosno povećanje gubitaka tokom godine — isključujući kritično razdoblje — ne traži povećanje izgradnje elektrana, već samo povećanje proizvodnje bilo hidroelektrana bilo termoelektrana, jer elektrane koje mogu zadovoljiti potrebe u kritičnom razdoblju mogu ih zadovoljiti i u razdobljima izvan kritičnog. Ako se povećanje potreba odnosno gubitaka pokriva povećanom proizvodnjom hidroelektrana, ono ne izaziva nove troškove, a ako se pokriva povećanom proizvodnjom termoelektrana, ono povećava njihove promjenljive troškove.

a) Potrebna dodatna snaga za nadoknadu gubitaka

Kao što je već naglašeno, za određivanje potrebne dodatne snage u termoelektranama mjerodavne su prilike u kritičnom razdoblju. Zbog toga polazimo od maksimalnog gubitka snage u kritičnom razdoblju ΔP_{mk}, koji određujemo iz izraza

$$\Delta P_{mk} = F \frac{P_{mk}^2}{q} \tag{311}$$

gdje je P_{mk} maksimalno opterećenje promatranog voda u kritičnom razdoblju (sl. 180).

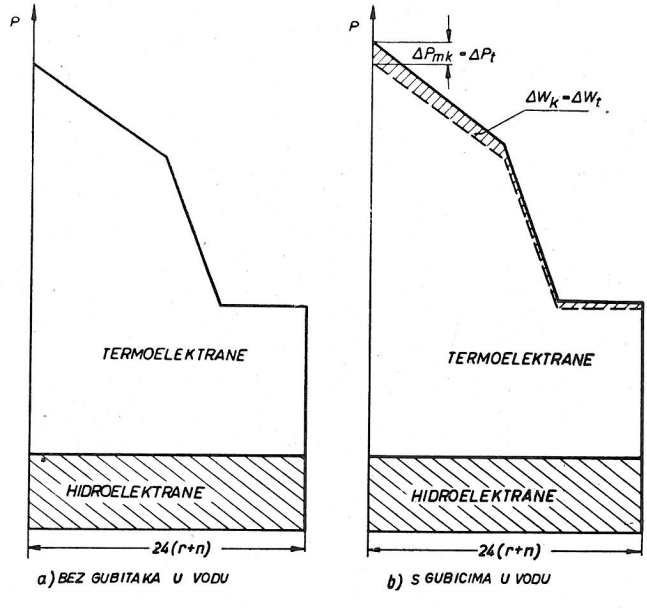
Potrebnu dodatnu snagu u termoelektranama (ΔP_t) — kako ćemo vidjeti — možemo prikazati u ovisnosti o gubitku snage izrazom

$$\Delta P_t = k \Delta P_{mk} \tag{312}$$

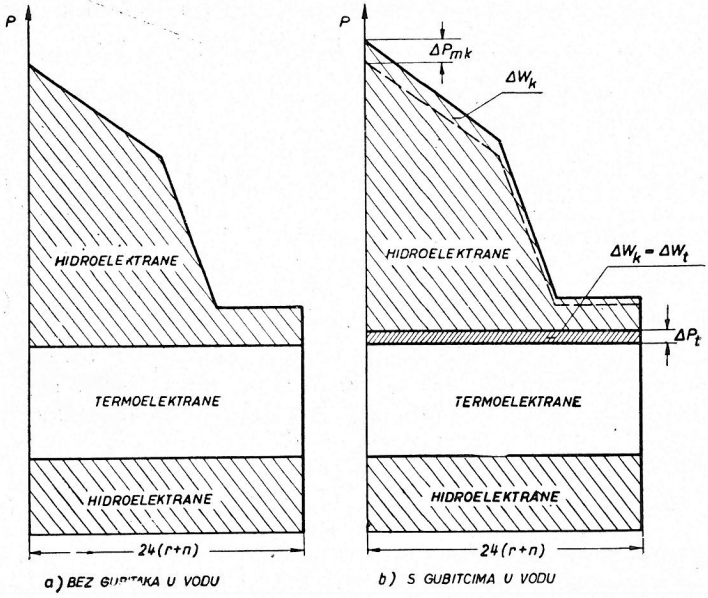
gdje je

$$k \leqq 1 \tag{313}$$

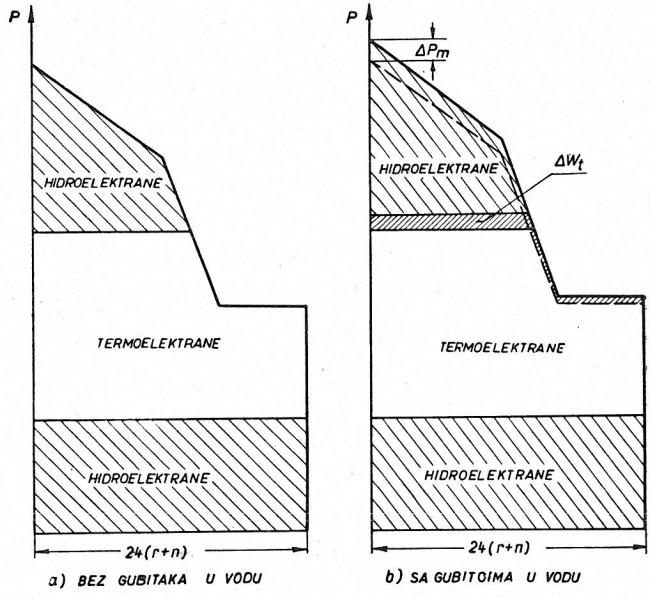
veličina koja je ovisna o prilikama u sistemu, s obzirom na odnos hidroenergije i termoenergije u kritičnom razdoblju, te o istodobnosti maksimalnog opterećenja voda s maksimalnim opterećenjem sistema.



Sl. 180. Prilike u kritičnom razdoblju u elektroenergetskom sistemu, u kojemu rade samo termoelektrane odnosno pored termoelektrana i protočne hidroelektrane.



Sl. 181. Prilike u kritičnom razdoblju u elektroenergetskom sistemu u kojemu je proizvodnja varijabilne energije u hidroelektranama tolika da može pokriti varijabilni dio dijagrama opterećenja.



Sl. 182. Prilike u kritičnom razdoblju u elektroenergetskom sistemu u kojemu proizvodnja varijabilne energije u hidroelektranama nije tolika da može pokriti varijabilni dio dijagrama opterećenja.

Promotrimo najprije prilike za slučaj (sl. 180) kad u elektroenergetskom sistemu postoje samo protočne hidroelektrane i termoelektrane, odnosno kad u sistemu postoje samo termoelektrane. S obzirom na potrebnu dopunsku snagu, zbog gubitaka u prijenosu, moguća proizvodnja protočnih hidroelektrana nema nikakvog utjecaja, pa ih se može i eliminirati iz razmatranja. Dakle, kad u sistemu postoje samo termoelektrane i kad je ispunjen i uvjet da se maksimalno opterećenje voda pojavljuje istodobno s maksimalnim opterećenjem sistema, veličina $k = 1$, jer je — prema sl. 180 —

$$\Delta P_t = \Delta P_{mk} \tag{314}$$

Ako uvjet istodobnosti maksimalnih opterećenja voda i sistema nije ispunjen, te ako opterećenje voda u momentu maksimalnog opterećenja sistema označimo s P'_{mk}, a gubitak snage u vodu u istom momentu s $\Delta P'_{mk}$, veličina k dobiva vrijednost

$$k = \frac{\Delta P'_{mk}}{\Delta P_{mk}} < 1 \tag{315}$$

Drugi krajnji slučaj, s obzirom na prilike u sistemu, prikazan je na sl. 181. Radi se o slučaju kad je u kritičnom razdoblju moguća proizvodnja varijabilne energije u hidroelektranama tolika da se njome može pokriti varijabilni dio dijagrama opterećenja u kritičnom razdoblju. Tada se povećanje potrebne proizvodnje radi gubitaka pokriva povećanjem proizvodnje termoelektrana, ali s konstantnom snagom tokom cijelog kritičnog razdoblja, jer se akumulacione hidroelektrane mogu prilagoditi novim potrebama i jer u kritičnom razdoblju, uz toliku moguću proizvodnju varijabilne energije u hidroelektranama, postoji snaga koja se ne može iskoristiti.

Gubitak energije u promatranom vodu tokom kritičnog razdoblja možemo odrediti iz izraza

$$\Delta W_k = \delta_k \Delta P_{mk} \; 24 (r + n) \tag{316}$$

gdje je δ_k faktor gubitka u kritičnom razdoblju, a $24 (r + n)$ trajanje kritičnog razdoblja u satima.

Potrebna dopunska snaga ΔP_t jednaka je snazi kojom se kroz $24 (r + n)$ sati može proizvesti količina energije ΔW_k (316), pa je

$$\Delta P_t = \delta_k \Delta P_{mk} \tag{317}$$

dakle, prema (312),

$$k = \delta_k \tag{318}$$

Relacija (318) vrijedi bez obzira da li postoji istodobnost maksimalnog opterećenja voda i maksimalnog opterećenja sistema.

Promotrimo sada slučaj (sl. 182) koji se nalazi između dva već opisana (sl. 180 i 181). Sada, naime, proizvodnja varijabilne energije hidroelektrana u kritičnom razdoblju nije dovoljna da pokrije varijabilni dio dijagrama opterećenja. Zbog povećanih gubitaka, proizvodnja hidroelektrana se smješta u još viši dio dijagrama opterećenja, pa termoelektrane kroz vrijeme rt_{hk} (sl. 182) nadoknađuju gubitke proizvodnjom s konstantnom snagom, a izvan tog vremena povećanje proizvodnje termoelektrana odgovara povećanju potreba radi gubitaka, i po snazi i po količini energije. Za određivanje potrebne dodatne snage termoelektrana mjerodavni su samo gubici kroz vrijeme rt_{hk}, jer kroz ostalo vrijeme postoji višak snage u termoelektranama, pa za pokrivanje tih gubitaka nije potrebna dodatna snaga u termoelektranama.

Kroz vrijeme rt_{hk} gubici energije u vodu iznose

$$\Delta W'_k = \int_0^{rt_{hk}} \Delta P \, dt \tag{319}$$

pa je potrebna dodatna snaga

$$\Delta P_t = \frac{1}{rt_{hk}} \int_0^{rt_{hk}} \Delta P \, dt \tag{320}$$

Uvrštenjem izraza (319) u (320), te postavljanjem relacije za relativno trajanje konstantnog opterećenja termoelektrana u varijabilnom dijelu dijagrama

$$\tau_{hk} = \frac{rt_{hk}}{24\,(r+n)} \tag{321}$$

kao i relativnih gubitaka za vrijeme rt_{hk}

$$w' = \frac{\Delta W'_k}{\Delta W_k} \tag{322}$$

te uzevši u obzir relaciju (316), dolazimo do izraza za potrebnu dodatnu snagu termoelektrane

$$\Delta P_t = \frac{w'}{\tau_{hk}} \delta_k \Delta P_{km} \tag{323}$$

pa je veličina k

$$k = \frac{w'}{\tau_{hk}} \delta_k \tag{324}$$

Relacija (324) predstavlja općeniti izraz za veličinu k za bilo kakve prilike u elektroenergetskom sistemu. Ako — za prilike prikazane

na sl. 180 — pretpostavimo da maksimalno opterećenje, pa prema tome i maksimalni gubici ΔP_{mk}, traje $r\Delta t$, koje može biti po volji kratko, relativne gubitke w' dobivamo iz izraza

$$w' = \frac{\Delta P_{mk}\, r\, \Delta t}{\delta_k\, \Delta P_{mk}\, 24\,(r+n)} \tag{325}$$

koristeći relaciju (316). U tom slučaju je i relativno trajanje konstantnog opterećenja termoelektrana u varijabilnom dijelu dijagrama

$$\tau_{hk} = \frac{r\, \Delta t}{24\,(r+n)} \tag{326}$$

pa je i $k = 1$, što je u skladu s ranijim razmatranjima. Za slučaj prikazan na sl. 181 vrijedi da je $w' = 1$ i $\tau_{hk} = 1$, pa je $k = \delta_k$.

Iz dosadašnjeg razmatranja međutim ne smije se zaključiti da se veličina k kreće između δ_k i 1, iako je to najčešći slučaj. Mogli bi naime zamisliti potrošača kod kojega je

$$w' < \tau_{hk} \tag{327}$$

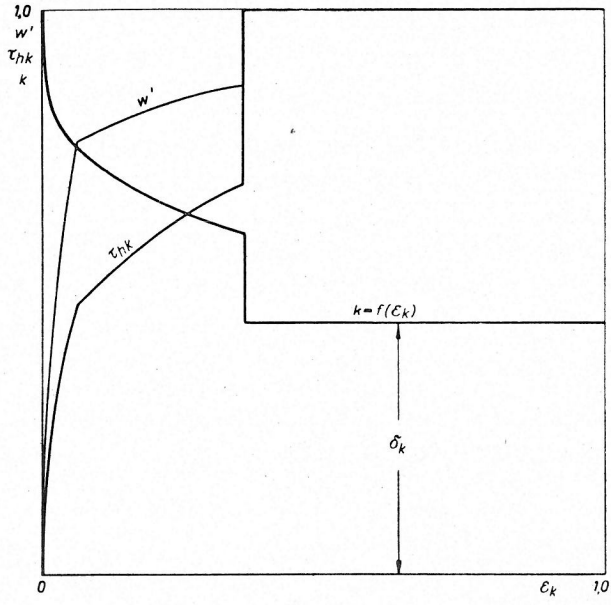
što znači da su relativni gubici (w') u vremenu rt_{hk} manji od relativnog trajanja (τ_{hk}) konstantnog opterećenja termoelektrana. To se može dogoditi u slučaju kad je opterećenje promatranog voda maleno u razdoblju velikih opterećenja, a veliko u razdoblju malih opterećenja. U krajnjem slučaju vod može biti neopterećen kroz vrijeme rt_{hk}, pa je tada $w' = 0$, a $k = 0$, što bi se moglo dogoditi za slučaj kad se vodom opskrbljuje neka industrija koja koristi samo noćnu energiju, ili kad je industrija napajana preko promatranog voda obustavljena u kritičnom razdoblju.

Prema tomu se vrijednost veličine k kreće u slijedećim granicama

$$0 \leqq k \leqq 1 \tag{328}$$

Ako detaljnije analiziramo utjecaje na veličinu k (324), moći ćemo konstatirati da ta veličina ovisi o prilikama u elektroenergetskom sistemu i o karakteristikama opterećenja voda. Prilike u elektroenergetskom sistemu utječu na relativno vrijeme τ_{hk}, karakteristike opterećenja voda na faktor gubitaka δ_k, dok na relativne gubitke kroz vrijeme τ_{hk} utječu i prilike u elektroenergetskom sistemu i karakteristike opterećenja voda.

Kao jednu od karakteristika sistema možemo uzeti omjer ε_k između varijabilne energije hidroelektrana i ukupne potrebne energije u kritičnom razdoblju. Taj omjer karakterizira promatrani elektroenergetski sistem s obzirom na raspored proizvodnje hidroenergije tokom godine i s obzirom na odnos protočnih i akumulacionih hidroelektrana. Na sl.



Sl. 183. Primjer toka krivulje τ_{hk} (321), w' (322) i k (324) o omjeru ε_k između varijabilne energije u hidroelektranama i ukupne potrebne energije u kritičnom razdoblju.

183 prikazana je samo primjera radi ovisnost τ_{hk} i w' o ε_k, za određeni faktor gubitaka u promatranom vodu. Skokovi na krivuljama na sl. 183. posljedica su aproksimacije krivulje trajanja opterećenja trima pravcima (poglavlje I 1c).

Tok krivulje prikazan na sl. 183 vrijedi za vod kojim se opskrbljuje neko područje s potrošačima različitih karakteristika. Međutim svakako je od interesa za brzo snalaženje poznavati veličinu k za vodove kojima se napajaju potrošači jednostavnih karakteristika, kao i za vodove koji spajaju elektrane s ostalim elektroenergetskim sistemom.

Faktor opterećenja voda kojim se napajaju konstantni potrošači (npr. tvornica karbida ili elektroliza aluminija) kao i voda koji spaja protočnu hidroelektranu s ostalom mrežom iznosi u kritičnom razdoblju $m_k = 1$, pa je faktor gubitaka u istom razdoblju $\delta_k = 1$. U tim su slučajevima relativni gubici w' jednaki relativnom vremenu τ_{hk}

$$w' = \tau_{hk} \tag{329}$$

pa je — prema (324) — $k = 1$.

Za vod koji spaja termoelektranu s ostalim sistemom veličinu k možemo odrediti iz slijedećeg razmatranja. U kritičnom razdoblju termoelektrane treba da rade konstantno barem kroz vrijeme rt_{hk}

kako bi sa svojom snagom (P_{mk}) proizvele najveću moguću količinu energije uzevši u obzir dijagram opterećenja. Uz takvu pretpostavku i uz bilo kakav dijagram opterećenja unutar vremena rt_{hk} omjer gubitaka w' možemo prikazati relacijom

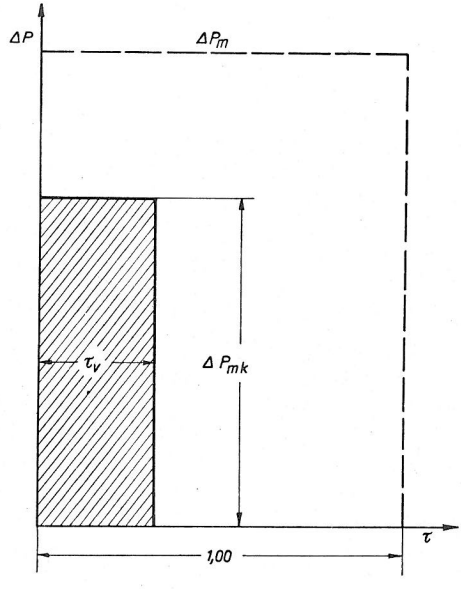
$$w' = \frac{\Delta P_{mk}\, rt_{hk}}{\Delta P_{mk}\, rt_{hk} + \Delta W''_k} \tag{330}$$

dok je faktor gubitaka

$$\delta_k = \frac{\Delta P_{mk}\, rt_{hk} + \Delta W''_k}{\Delta P_{mk}\; 24\,(r+n)} \tag{331}$$

gdje su $\Delta W''_k$ gubici u vodu izvan vremena rt_{hk}. Uzevši u obzir relacije (321) i (324) možemo konstatirati da je u svim slučajevima $k = 1$ i to bez obzira na vrijednost gubitaka $\Delta W''_k$.

Možemo s dovoljnom tačnošću — za naša razmatranja — pretpostaviti da akumulaciona hidroelektrana u dijelu kritičnog razdoblja radi s konstantnom snagom. Ta pretpostavka približno vrijedi za hidroelektrane koje rade prema voznom redu, a ne može se proširiti na hidroelektrane koje sudjeluju u regulaciji frekvencije. Uz navedenu pretpostavku krivulju trajanja gubitaka u vodu koji spaja akumulacionu hidroelektranu s ostalim elektroenergetskim sistemom možemo prikazati pravokutnikom (sl. 184) s visinom ΔP_{mk} i osnovicom τ_v, koja



Sl. 184. Aproksimacija krivulje trajanja gubitaka u vodu, koji spaja akumulacionu hidroelektranu s elektroenergetskim sistemom.

prikazuje relativno vrijeme trajanja opterećenja. Možemo pretpostaviti da je proizvodnja hidroelektrana ostvaruje u razdoblju najvećih opterećenja, pa da τ_{hk} (321) pada unutar vremena τ_v kad je $\tau_{hk} < \tau_v$, odnosno da τ_v pada unutar vremena τ_{hk} kad je $\tau_{hk} > \tau_v$.

Faktor gubitaka — definiran je relacijom (308) — za pretpostavljeni dijagram opterećenja iznosi u svim slučajevima

$$\delta_k = \tau_v \tag{332}$$

Promotrimo najprije prilike kad je ispunjena nejednadžba

$$\tau_{hk} < \tau_v \tag{333}$$

Tada je omjer gubitaka definiran relacijom (325) jednak

$$w' = \frac{\tau_{hk}}{\tau_v} \tag{334}$$

pa je — prema relaciji (324) — omjer $k = 1$.

Međutim za slučaj kad je

$$\tau_{hk} > \tau_v \tag{335}$$

omjer gubitaka je $w' = 1$, pa je

$$k = \frac{\tau_v}{\tau_{hk}} \tag{336}$$

Omjer k (312) definiran je maksimalnim opterećenjem odnosno maksimalnim gubicima u kritičnom razdoblju. S obzirom na daljnje analize zgodnije je mjesto maksimalnog opterećenja u kritičnom razdoblju računati s maksimalnim opterećenjem tokom godine. Radi toga uvodimo omjer između maksimalnih gubitaka u kritičnom razdoblju (ΔP_{mk}) i maksimalnih gubitaka tokom godine (ΔP_m), pa je omjer β definiran relacijom

$$\beta = \frac{\Delta P_{mk}}{\Delta P_m} \leqq 1 \tag{337}$$

Taj omjer može se definirati i maksimalnim opterećenjima, pa je

$$\beta = \left(\frac{P_{mk}}{P_m}\right)^2 = \sigma^2 \leqq 1 \tag{338}$$

I za omjer β mogu se navesti veličine za pojedine vodove kojima se opskrbljuju konstantni potrošači odnosno za vodove koji spajaju termoelektrane i hidroelektrane s ostalim elektroenergetskim sistemom.

Za konstantne potrošače omjer β ima vrijednost $\beta = 1$, što vrijedi u svim slučajevima kad nije računato s redukcijom potrošnje takvih potrošača. Ako se međutim računa s redukcijom tih potrošača, a do redukcije dolazi u kritičnom razdoblju, treba i to uzeti u račun. Potrebnu snagu za konstantnog potrošača u kritičnom razdoblju, uzevši u obzir redukciju, možemo prikazati relacijom

$$P_{mk} = \sigma P_m \tag{339}$$

gdje je P_m maksimalna snaga odnosno konstantna snaga bez redukcije. Prema tome je omjer β

$$\beta = \sigma^2 \tag{340}$$

U ovom slučaju može biti i $\beta = 0$, ako je predviđeno potpuno obustavljanje konstantnog potrošača.

Za vod koji spaja termoelektranu s elektroenergetskim sistemom u svim slučajevima treba računati da će se u kritičnom razdoblju angažirati maksimalna snaga termoelektrane, pa će u svim slučajevima biti i $\beta = 1$.

Za vod koji spaja hidroelektrane s ostalim elektroenergetskim sistemom omjer β možemo definirati istodobno za protočne i akumulacione hidroelektrane. I sada — kao za slučaj konstantnih potrošača — možemo maksimalnu snagu u kritičnom razdoblju definirati izrazom (339), gdje je P_m maksimalna snaga hidroelektrane, pa je omjer β određen relacijom (340).

Omjer β ovisi dakle samo o karakteristikama opterećenja promatranog voda, te na njega nemaju utjecaja prilike u elektroenergetskom sistemu.

Potrebna dodatna snaga u termoelektranama kojom se nadoknađuju gubici u vodu određuje se, dakle, iz izraza

$$\Delta P_t = k \beta \Delta P_m \tag{341}$$

Prema ranije izloženom veličina k je ovisna o prilikama u elektroenergetskom sistemu i o karakteristikama opterećenja promatranog voda, dok je β ovisan samo o karakteristikama opterećenja promatranog voda. Dakle za određeni elektroenergetski sistem, odnosno za određeno stanje razvoja promatranog elektroenergetskog sistema, kao i za određene karakteristike opterećenja voda, veličine k i β su

konstante koje su neovisne o maksimalnom opterećenju voda. Možemo prema tome postaviti, da je — uz navedena ograničenja —

$$\Delta P_t = f(\Delta P_m) \tag{342}$$

Promatrajući međusobni odnos potrebne dodatne snage (ΔP_t) i maksimalnih gubitaka (ΔP_m), može se konstatirati da vrijede granice

$$0 \leqq \Delta P_t \leqq \Delta P_m \tag{343}$$

jer prema ranije izloženom vrijedi, da je

$$0 \leqq k\,\beta \leqq 1 \tag{343 a}$$

b) Potrebna dodatna proizvodnja za nadoknadu gubitaka

Kako je već spomenuto gubici u vodu nadoknađuju se povećanjem proizvodnje u elektranama. Nadoknađivanje se vrši povećanjem proizvodnje bilo u hidroelektranama bilo u termoelektranama. Povećanje proizvodnje u hidroelektranama nema ekonomskih reperkusija, dok povećanje proizvodnje u termoelektranama izaziva dodatne troškove. Analizirajmo utjecaj gubitaka energije na povećanje proizvodnje termoelektrana.

I sada, kao i u poglavlju VII 3 a, možemo sve slučajeve na sl. 70 podijeliti u četiri grupe slučajeva, koje su iste s grupama slučajeva u tab. 28.

Za grupu slučajeva *A* (slučajevi 1 do 5 na sl. 70) možemo postaviti, da je

$$\Delta W_t = 0$$

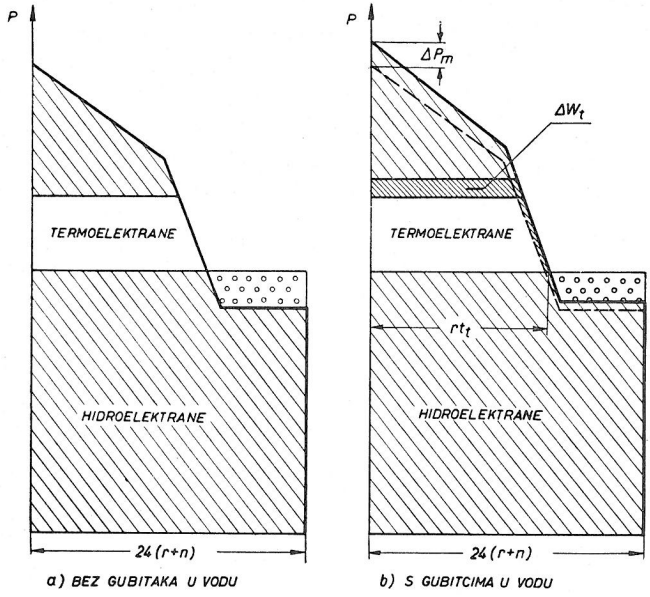
jer se svi gubici ΔW nadoknađuju povećanjem proizvodnje hidroelektrana, pa povećanje proizvodnje termoelektrana ΔW_t nije potrebno.

Prilike za *B* grupu slučajeva (slučajevi 6, 7 i 14) prikazani su na sl. 185. Potrebno povećanje proizvodnje termoelektrana može se sada odrediti iz izraza

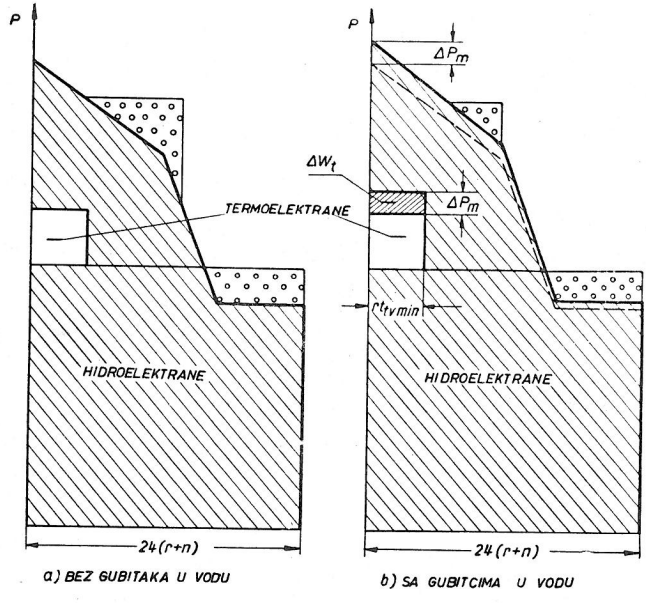
$$\Delta W_t = \int_0^{rt_t} \Delta P\, dt \tag{344}$$

koji možemo prikazati relacijom

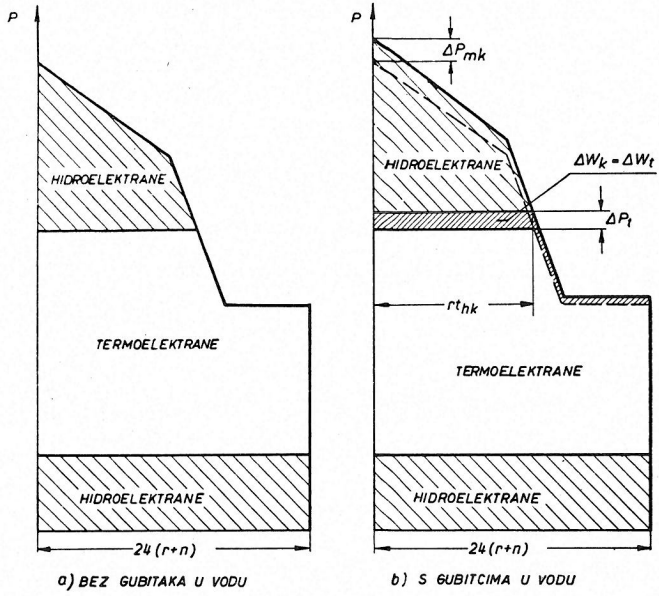
$$\Delta W_t = w'' \Delta W \tag{345}$$



Sl. 185. Potrebno povećanje proizvodnje termoelektrana radi gubitaka prijenosa kad u sistemu vladaju prilike koje odgovaraju slučajevima 6, 7 i 14 (sl. 70).



Sl. 18. Potrebno povećanje proizvodnje termoelektrana radi gubitaka prijenosa kad u sistemu vladaju prilike koje odgovaraju slučajevima 10, 11, 12 i 13 (sl. 70).



Sl. 187. Potrebno povećanje proizvodnje termoelektrana radi gubitaka prijenosa kad u sistemu vladaju prilike koje odgovaraju u slučajevima 8, 9, 15, 16, 17 i 18 (sl. 70).

gdje je w'' omjer između vrijednosti integrala na desnoj strani relacije (344) i ukupnih gubitaka ΔW.

Za grupu slučajeva D (slučajevi 10 do 13) principijelni prikaz prilika vidi se na sl. 186. Povećanje proizvodnje termoelektrana radi gubitaka određeno je sada gubicima snage ΔP_m u momentu maksimalnog opterećenja sistema. To povećanje proizvodnje termoelektrana iznosi

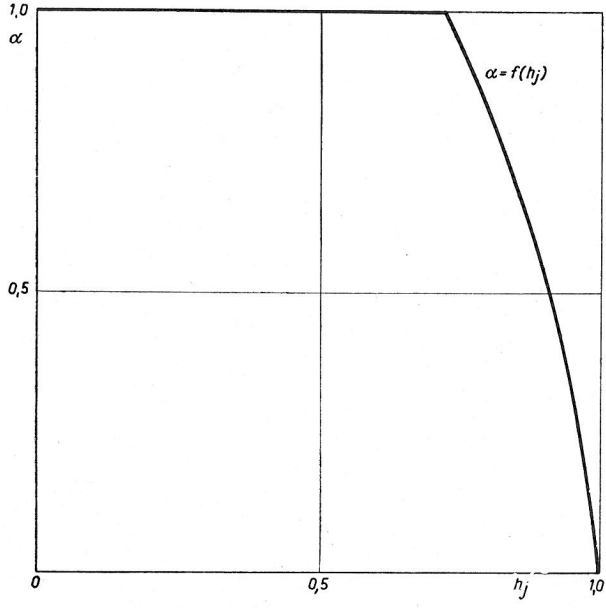
$$\Delta W_t = \Delta P_m \, rt_{tv\min} \tag{346}$$

gdje je $rt_{tv\,\min}$ minimalno trajanje korištenja angažirane snage termoelektrana u promatranom razdoblju (Poglavlje IV 3 a).

Konačno imamo grupu slučajeva C, u koju možemo ubrojiti slučajeve 8, 9 i 15 do 18 (sl. 187). Povećanje proizvodnje termoelektrana zbog gubitaka sada je upravo jednako gubicima energije, pa vrijedi relacija

$$\Delta W_t = \Delta W \tag{347}$$

Poznavajući pojavu pojedinih grupa slučajeva u mjesecu, kako je to prikazano na sl. 131, a opisano u poglavlju VIII 3 b, te pretpostavivši da su gubici energije u svim radnim danima u promatranom



Sl. 188. Primjer ovisnosti veličine α (350) o postotku hidroenergije (h_j) u ukupnoj proizvodnji.

mjesecu međusobno jednaki, možemo omjer između povećanja proizvodnje u termoelektranama u promatranom mjesecu ΔW_{tm} i gubitaka energije u promatranom mjesecu ΔW_m

$$\alpha_m = \frac{\Delta W_{tm}}{\Delta W_m} \tag{348}$$

prikazati izrazom

$$\alpha_m = v_B W'' + v_D \frac{\Delta P_m \, rt_{tv\min}}{\Delta W_m} + v_C \tag{349}$$

gdje su v_B, v_C i v_D relativna trajanja grupa slučajeva.

Ako s μ označimo omjer gubitaka u pojedinim mjesecima i ukupnih godišnjih gubitaka, omjer između godišnjeg povećanja proizvodnje u termoelektranama i godišnjih gubitaka energije možemo prikazati relacijom

$$\alpha = \sum_{m=1}^{12} \alpha_m \mu_m \tag{350}$$

Primjer za ovisnost omjera α o udjelu hidroenergije h_j u ukupnoj proizvodnji u nekom elektroenergetskom sistemu prikazan je na sl.

188. Ne treba ni naglasiti da sl. 188 služi samo kao ilustracija, a može se upotrijebiti samo za elektroenergetski sistem za koji je određena, kao i za vod koji je razmatran.

Uzevši u obzir da se grupe slučajeva B i D ne pojavljuju često (sl. 132), ne će se učiniti veća pogreška ako u (349) postavimo $w'' = 1$, te ako zanemarimo drugi član na desnoj strani relacije (349). Tada je

$$\alpha_m = v_B + v_C \tag{351}$$

što se može uzeti kao prva aproksimacija veličine α_m.

Uzevši dakle u obzir (308) za ukupne gubitke tokom godine, te omjer α (350), godišnje povećanje proizvodnje u termoelektrana zbog gubitaka iznosi

$$\Delta W_t = \alpha \, \delta \, \Delta P_m t_o \tag{352}$$

gdje je $t_o = 8760$ sati/god.

3. Vrijednost gubitaka

Vrijednost gubitaka definirana je troškovima koje gubici izazivaju u elektroenergetskom sistemu.

Vrijednost gubitaka možemo prema izloženom podijeliti u dva dijela: gubici koji izazivaju potrebu povećanja instalirane snage termoelektrana i gubici koji izazvaju povećanje proizvodnje termoelektrana.

Potrebno povećanje snage termoelektrana definirano je izrazom (341). Međutim, ako želimo da osiguramo potrebnu snagu baš u kritičnom razdoblju, potrebno je računati i s rezervom snage odnosno množiti izraz (341) s faktorom rezerve ϱ. Snagu ΔP_t treba smatrati kao snagu na pragu elektrana, pa da dobijemo troškove treba još (341) množiti sa specifičnim troškovima snage termoelektrane b_t u Din/god po kW na pragu termoelektrane.

Potrebno povećanje proizvodnje termoelektrana prikazano je izrazom (352), pa ga je za određivanje povećanja troškova potrebno pomnožiti još sa srednjim specifičnim troškovima za gorivo (k_b Din/kWh) preračunatim na prag elektrane, jer povećanje gubitaka pokrivaju i najekonomičnije (u doba velikih voda) i najneekonomičnije termoelektrane (u doba vrlo malih voda).

Za tačnije određivanje specifičnih promjenljivih troškova k_b može se i u ovom slučaju upotrijebiti metoda prikazana u poglavlju VII 4. Prema tome možemo vrijednost gubitaka prikazati izrazom

$$E_v = \Delta P_m (\varrho \, b_t \, k \, \beta + k_b \, \alpha \, \delta \, t_o) \text{ din/god.} \tag{353}$$

Izraz (353) vrijedi za prenosne vodove kod kojih možemo zanemariti gubitke praznog hoda. Međutim kad se radi o vodovima vrlo

visokog napona te gubitke ne možemo zanemariti. Također gubitke praznog hoda ne možemo zanemariti kad razmatramo gubitke u transformatorima.

Za takve slučajeve treba gubicima, koje smo dosada razmatrali, dodati gubitke praznog hoda ΔP_o (gubici radi korone ili gubici u željezu), jer su oni neovsni o opterećenju. Osim toga možemo pretpostaviti da je vod ili transformator u pogonu kroz cijelu godinu, što je normalno i slučaj. U ovom slučaju radi se o konstantnom potrošaču. Omjer k i β jednaki su 1, to vrijedi i za faktor gubitaka δ, dok omjer α — kojega sada označimo s α_0 — određujemo prema relaciji (350), uzevši u obzir da je $\mu_1 = \mu_2 = \ldots = \frac{1}{12}$. Prema tome možemo vrijednost gubitaka prikazati slijedećom relacijom

$$E_v = (k\,\beta\,\Delta P_m + \Delta P_o)\,\varrho\, b_t + (\alpha\,\delta\,\Delta P_m + \alpha_o\,\Delta P_o)\,k_b\,t_o \qquad (354)$$

Izraz za vrijednost gubitaka omogućuje ekonomsko-energetske analize, od kojih je jedna prikazana u slijedećem poglavlju.

4. Optimalni presjek voda

a) Uvjet minimuma troškova u sistemu

Pretpostavimo da je u elektroenergetskom sistemu potrebno izgraditi vod određene duljine i po određenoj trasi za opskrbu nekog područja ili za povezivanje dvaju područja. Pretpostavimo dalje da je na kraju voda potrebno staviti na raspolaganje maksimalnu snagu P_m i godišnju količinu energije W.

Uzevši u obzir potrebnu dodatnu snagu u termoelektranama (ΔP_t) i potrebnu dodatnu proizvodnju termoelektrana (ΔW_t), koje su određene relacijama (341) i (352), ukupne troškove u sistemu — u kojemu rade hidroelektrane i termoelektrane — možemo prikazati jednadžbom

$$K = K_h + \varrho\, b_t\,(P_t + \Delta P_t) + k_b\,(W_t + \Delta W_t) + K_v \qquad (355)$$

gdje su K_h troškovi hidroelektrana, P_t potrebna snaga termoelektrana za slučaj da nema gubitaka u promatranom dalekovodu, ΔP_t potrebna dodatna snaga termoelektrana koja je potrebna radi gubitaka u promatranom dalekovodu, k_b troškovi za gorivo u termoelektranama po kWh, W_t potrebna proizvodnja termoelektrana u slučaju da nema gubitaka u dalekovodu, ΔW_t dodatna proizvodnja termoelektrana zbog gubitaka u dalekovodu, a K_v stalni godišnji troškovi dalekovoda.

Veličine K_h, ϱ, b_t, P_t, k_b i W_t su neovisne o vodu, za koji hoćemo da odredimo presjek. Istina u P_t i W_t uključena je potrošnja koja se

opskrbljuje promatranim vodom, ali na njihov iznos nemaju utjecaja gubici u promatranom vodu. Veličine ΔP_t, ΔW_t i K_v ovise o vodu.

Od svih veličina koje karakteriziraju vod praktički jedino presjek vodiča ima utjecaja na prilike u elektroenergetskom sistemu. Tip i materijal stupova, tip izolatora i sl. nema utjecaja na ostale dijelove elektroenergetskog sistema, pa je postizavanje optimalnog rješenja za tip i materijal stupa, tip izolatora i sl. na određenoj trasi ujedno i optimalno rješenje za elektroenergetski sistem. Napon voda sigurno utječe na elektroenergetski sistem, ali budući da postoje dosta veliki skokovi između nazivnih napona, moguće je, s nešto iskustva, unaprijed odrediti potrebni nazivni napon poznavajući duljinu voda i snagu koju treba prenijeti. Radi toga može se pretpostaviti da je napon unaprijed zadana veličina. Međutim ništa ne stoji na putu da se izvrši usporedba rješenja s različitim naponima, te da se izabere povoljno rješenje.

Prema tome za određeni tip i materijal stupova, tip izolatora i sl. investicije za vod su funkcija presjeka, pa su i stalni godišnji troškovi voda

$$K_v = f(q) \tag{356}$$

Za vod u određenom elektroenergetskom sistemu i s određenim karakteristikama opterećenja dodatna snaga i dodatna proizvodnja ovisne su o maksimalnim gubicima snage — prema (341) i (352) — pa je

$$\Delta P_t = f(\Delta P_m) \tag{357}$$

$$\Delta W_t = f(\Delta P_m) \tag{358}$$

Za vod određene duljine, materijala, opterećenja, nazivnog napona i određenog faktora snage, gubici snage su funkcija presjeka, pa je

$$\Delta P_t = f(q) \tag{359}$$

$$\Delta W_t = f(q) \tag{360}$$

Prema tome može se postaviti da su ukupni troškovi u sistemu

$$K = f(q) \tag{361}$$

pa je uvjet minimuma troškova u sistemu postignut, kad je

$$\frac{dK}{dq} = 0 \tag{362}$$

i

$$\frac{d^2K}{dq^2} > 0 \tag{363}$$

Deriviranjem izraza (355) po q dobivamo

$$\frac{dK}{dq} = \varrho\, b_t \frac{d(\Delta P_t)}{dq} + k_b \frac{d(\Delta W_t)}{dq} + \frac{dK_v}{dq} = 0 \tag{364}$$

Za ΔP_t uzevši (341) i (297) možemo pisati

$$\Delta P_t = \frac{k\,\beta\, FP^2{}_m}{q} \tag{365}$$

Mjesto ΔW_t možemo — prema (352) i (297) — uvrstiti vrijednost

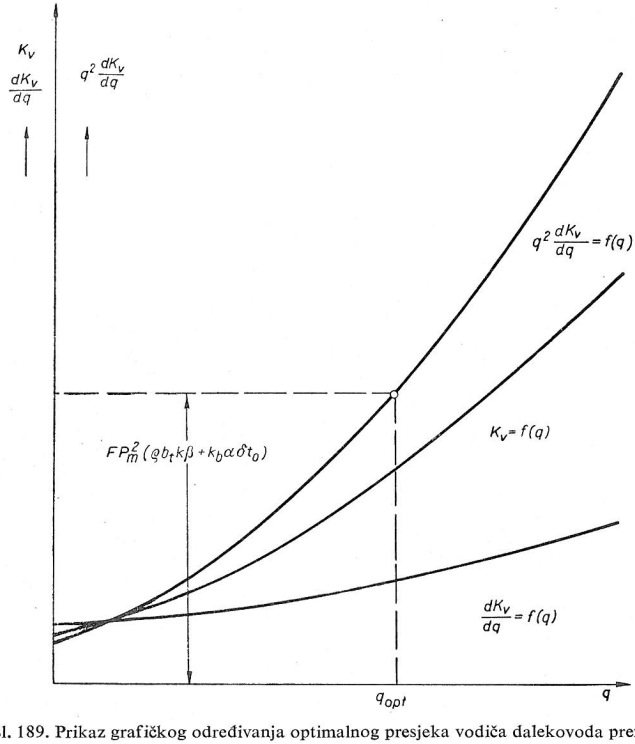
$$\Delta W_t = \frac{\alpha\,\delta\, t_o\, F\, P^2{}_m}{q} \tag{366}$$

pa (364) dobiva slijedeći oblik

$$q^2 \frac{dK_v}{dq} = FP^2{}_m (\varrho\, b_t\, \beta\, k + k_b\, \alpha\, \delta\, t_o) \tag{367}$$

Druga derivacija izraza (364) glasi

$$\frac{d^2K}{dq^2} = \frac{2\, FP^2{}_m}{q^3} (\varrho\, b_t\, \beta\, k + k_b\, \alpha\, \delta\, t_o) + \frac{d^2K_v}{dq^2} \tag{368}$$



Sl. 189. Prikaz grafičkog određivanja optimalnog presjeka vodiča dalekovoda prema (367).

gdje u prvom članu na desnoj strani imamo sve pozitivne veličine, dok je drugi član derivacija rastuće funkcije, pa je i njena druga derivacija pozitivna veličina. Dakle je ispunjena nejednadžba (363), pa ispunjenjem uvjeta iz (367) dobivamo minimum troškova u elektroenergetskom sistemu.

Određivanje optimalnog presjeka dalekovoda prema (367) moguće je provesti grafički kako je prikazano na sl. 189.

Sva dosadašnja razmatranja vrijede za slučaj kad se računa da će u svim godinama za vrijeme vijeka trajanja dalekovoda vladati iste prilike na dalekovodu i u elektroenergetskom sistemu. Međutim teško je zamisliti da će se u praksi pojaviti takav slučaj, pa je potrebno razmatranje provesti uz pretpostavku promjena prilika i u sistemu i dalekovodu.

Polazimo i sada od jednadžbe (355), koja prikazuje ukupne troškove u sistemu, koju sada pišemo u obliku

$$K = K_o + \varrho\, b_t \Delta P_t + k_b \Delta W_t + K_v \tag{369}$$

gdje K_o prikazuje sve članove, koji ne ovise o presjeku dalekovoda.

Sve troškove sistema svodimo na početak prve godine, pa — ako s p označimo kamatnu stopu — troškovi u sistemu u n-toj godini iznose

$$K_n = \frac{K_{on}}{(1+p)^n} + \frac{\varrho\, b_{tn} \Delta P_{tn}}{(1+p)^n} + \frac{k_{bn} \Delta W_{tn}}{(1+p)^n} + \frac{K_v}{(1+p)^n} \tag{370}$$

Ukupne troškove za n godina — koliki je vijek trajanja dalekovoda — određujemo kao sumu troškova u n godina

$$\begin{aligned} \sum_1^n K_n = \sum_1^n \frac{K_{on}}{(1+p)^n} + \sum_1^n \frac{\varrho\, b_{tn} \Delta P_{tn}}{(1+p)^n} + \\ + \sum_1^n \frac{k_{bn} \Delta W_{tn}}{(1+p)^n} + K_v \sum_1^n \frac{1}{(1+p)^n} \end{aligned} \tag{371}$$

I sada možemo odrediti minimum troškova u sistemu. Minimum je postignut, kad je

$$\begin{aligned} q^2 \frac{dK_v}{dq} \sum_1^n \frac{1}{(1+p)^n} = \sum_1^n \frac{\varrho\, b_{tn} \beta_n k_n F_n P^2_{mn}}{(1+p)^n} + \\ + t_o \sum_1^n \frac{k_{bn} \alpha_n \delta_n F_n P^2_{mn}}{(1+p)^n} \end{aligned} \tag{372}$$

Jednadžba (372) izvedena je uz pretpostavku da se sve veličine, koje ovise o prilikama u elektroenergetskom sistemu (k, α), koje ovise o stepenu razvoja sistema (b_t, k_b), kao i one, koje ovise o karakteristikama opterećenja dalekovoda (k, β, δ, F i P_m), mijenjaju s vremenom.

b) Utjecaj na optimalni presjek vodiča

Za tačno određivanje optimalnog presjeka voda potrebno je dakle unaprijed poznavati razvoj sistema i razvoj opterećenja na promatranom vodu. Neke promjene međutim odvijaju se brže, a neke polaganije, pa je moguće — radi pojednostavljenja — ove posljednje smatrati kao konstante tokom godinâ.

Općenito se može kazati da je promjena prilika u sistemu polagana pogotovo ako je elektroenergetski sistem velik i ako se sistem ne nalazi na prekretnici radi iscrpljenja vodnih snaga, zbog toga se može smatrati veličina α približno konstantnom, što vrijedi i za utjecaj prilika u sistemu na veličinu k, koji se očituje u promjeni relativnog trajanja τ_h u izrazu (324).

Specifični stalni troškovi kao i specifični troškovi za gorivo u termoelektranama imaju tendenciju smanjivanja zbog upotrebe sve viših parametara pare i zbog upotrebe sve većih agregata. Međutim ne treba očekivati naglije smanjivanje specifičnih stalnih troškova (b_t) zbog upotrebe sve viših parametara pare i savršenijih termičkih shema, dok smanjivanje specifičnih troškova za gorivo u novim termoelektranama (k_b) nema tolikog utjecaja, jer u (372) treba uvrstiti srednje specifične troškove za gorivo, jer povećanje gubitaka pokrivaju i najekonomičnije i najneekonomičnije termoelektrane. Zbog toga se može pretpostaviti — kao prva aproksimacija — da su b_t i k_b konstantne veličine.

Karakteristike opterećenja nekog potrošačkog područja, kao što su veličina β, faktor gubitaka δ, faktor snage cos.φ (koji predstavlja jedinu promjenljivu veličinu u F), omjer gubitaka w' (322), te τ_{hk} također se vrlo polagano mijenjaju, pa se — opet u prvoj aproksimaciji — može smatrati da su k, β, F i δ konstantne veličine.

Uzevši u obzir sve izloženo, jednadžba (372) prelazi u jednadžbu

$$q^2 \frac{dK_v}{dq} \sum_1^n \frac{1}{(1-p)^n} = (\varrho\, b_t\, k\, \beta + k_b\, \alpha\, \delta\, t_o)\, F \sum_1^n \frac{P^2{}_{mn}}{(1+p)^n} \qquad (373)$$

gdje je računato s promjenom maksimalnog opterećenja voda, koje se tokom vremena i najviše mijenja u slučaju kad vod opskrbljuje neko konzumno područje. Nema, međutim, promjene maksimalnog opterećenja voda, ako vod treba da služi kao veza između elektrane i ostale mreže, jer je tada maksimalno optrećenje voda zadano maksimalnom snagom elektrane. U tom slučaju jednadžba (372) prelazi

u jednadžbu (367), ako računamo da su — kako smo ranije pretpostavili — i sve ostale veličine konstantne.

Upotreba jednadžbe (372) traži poznavanje tendencije razvoja elektroenergetskog sistema, u koji će biti uklopljen promatrani vod, kao i tendencije razvoja opterećenja promatranog voda, na osnovu čega će biti moguće odrediti i sve potrebne veličine. Sigurno je međutim da je moguće tačnije ocijeniti razvoj u neposrednoj nego u daljoj budućnosti, pa bi se moglo pomisliti da ta nesigurnost onemogućuje upotrebu izvedenih formula. Međutim utjecaj dalje budućnosti na veličinu suma koje se pojavljuju u navedenim izrazima to je manja što je budućnost dalja, jer izraz u nazivniku raste s povećanjem n.

Osim toga nesigurna predviđanja razvoja u budućnosti, pa prema tome i izvjesna nesigurnost u određivanju izraza na desnoj strani jednadžbe (372), nema tako velikog utjecaja na određivanje optimalnog presjeka dalekovoda kako se čini na prvi pogled. Na lijevoj strani spomenute jednadžbe naime dolazi presjek u kvadratu, pa se pogreška u određivanju desne strane ne očituje u punom iznosu na optimalni presjek, već — u najnepovoljnijem slučaju — u veličini koja je proporcionalna drugom korijenu pogreške.

Ako osim toga uvažimo da se izborom presjeka vodiča moramo prilagoditi normalnim presjecima, utjecaj nesigurnosti predviđanja postaje još manji.

Veći stalni troškovi termoelektrana (b_t) i veći specifični troškovi za gorivo u termoelektranama (k_b) opravdavaju veći presjek vodiča dalekovoda. Također i veći faktor gubitaka (δ), pa prema tome i veći faktor opterećenja dalekovoda (m) — prema (310) — djeluju u smislu povećanja optimalnog presjeka vodiča, a to isto vrijedi za omjer (β) između kvadrata maksimalnog opterećenja dalekovoda u kritičnom razdoblju i kvadrata maksimalnog godišnjeg opterećenja dalekovoda.

Veličina k i α ovise — kako smo već konstatirali — o prilikama u elektroenergetskom sistemu, pa se općenito može reći da su veličine k i α to veće što je manji udio hidroelektrana u ukupnoj proizvodnji sistema. Dakle u sistemima u kojima je udio hidroelektrana malen ima više opravdanja veći presjek vodiča dalekovoda, nego u sistemima u kojima se veći dio energije proizvodi u hidroelektranama. Tako u krajnjem slučaju za elektroenergetski sistem u kojemu hidroenergija iznosi 95% i više od ukupne proizvodnje možemo postaviti da je $\alpha \cong 0$, pa se drugi član jednadžbe (367) i (372) može zanemariti, dok veličina k (u prvom članu) dobiva najmanju moguću vrijednost, koja ovisi o karakteristikama opterećenja voda.

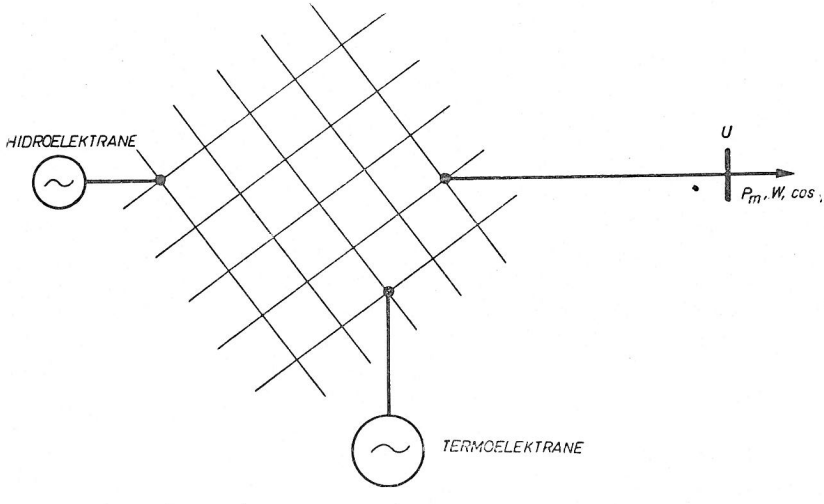
Uz iste promjene konstanata tokom godina u brojnicima jednadžba (367) i (372) desna strana postaje sve manja što je kamatna stopa (p) veća. Što drugim riječima znači da u zemlji s visokom kamatnom stopom optimalni presjek vodiča izlazi manji, što je i opravdano, jer je visoka kamatna stopa znak pomanjkanja osnovnih sredstava, a s manjim se presjekom smanjuju i potrebna osnovna sredstva za gradnju dalekovoda.

Duljina dalekovoda nema praktički utjecaja na optimalni presjek dalekovoda. Taj zaključak tačno vrijedi za kratke vodove, kod kojih gubitak snage ne moramo računati pomoću izraza (306) i (307). U jednadžbama (367) i (372) možemo, naime, mjesto ukupnih troškova za dalekovod (K_v) postaviti $l\,K_{v1}$, gdje K_{v1} znači troškove dalekovoda po km. Osim toga u veličini F (298), koja se nalazi na desnoj strani, dolazi u brojniku duljina voda l, pa se duljine l mogu skratiti. Budući da su sve preostale veličine neovisne o duljini dalekovoda, ne postoji ovisnost optimalnog presjeka o duljini.

Tako egzaktan zaključak ne možemo izvesti za vrlo duge vodove, jer za njih moramo za određivanje gubitaka snage upotrijebiti jednadžbu (306), u kojoj osim duljine dolazi i veličina k_R, koja je ovisna o duljini. Nakon skraćivanja lijeve i desne strane jednadžbe (367) i (372) s l, ostaje na desnoj strani još veličina F, u kojoj dolaze k_R i k_C (sl. 179), a koje su ovisne o duljini voda. Veličina k_R opada s povećanjem duljine, dok s porastom duljine k_C raste, pa — prema (306) i (307) — F s povećanjem duljine voda postaje manje. Odatle možemo zaključiti da za vrlo duge vodove — uz inače iste prilike — optimalni presjek postaje to manji što je duljina dalekovoda veća. Međutim taj utjecaj je malen, jer se radi o relativno maloj promjeni veličina k_R i k_C, a i radi toga jer presjek (q) na lijevoj strani dolazi u kvadratu.

c) Utjecaj gubitaka prijenosa u mreži sistema

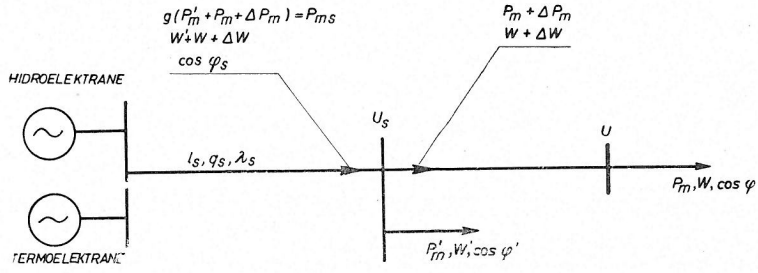
Pri razmatranju utjecaja gubitaka u promatranom dalekovodu na elektroenergetski sistem, pretpostavili smo da je otpor mreže između elektrana i sabirnica, na koje se priključuje promatrani dalekovod,



Sl. 190. Shema elektroenergetskog sistema s promatranim dalekovodom.

zanemarivo malen (sl. 190). Međutim otpor mreže sistema ima konačnu vrijednost, pa su gubici u mreži elektroenergetskog sistema ovisni o veličini gubitaka u promatranom dalekovodu, pa — pozivom na ranije izloženo — mreža sistema utječe na optimalni presjek dalekovoda.

Pođimo od sl. 191, na kojoj je mreža elektroenergetskog sistema prikazana dalekovodom duljine l_s i presjeka vodiča q_s. Sa sabirnica,



Sl. 191. Shema elektroenergetskog sistema s promatranim dalekovodom, i dalekovodom, koji zamenjuje mrežu između elektrana i promatranog dalekovoda.

na koje je priključen promatrani dalekovod, napajaju se i drugi potrošači, čija je potrošnja neovisna o potrebama na kraju promatranog voda.

Ukupne troškove u elektroenergetskom sistemu možemo i sada prikazati jednadžbom (355), odnosno uvjet minimuma jednadžbama (367) i (372). Potrebno je međutim definirati veličine ΔP_t i ΔW_t za izmijenjene prilike.

Dodatna snaga termoelektrana (ΔP_t) određena je u (341) pomoću maksimalnog gubitka snage u dalekovodu. Sada se gubitak snage sastoji iz gubitka u promatranom dalekovodu i gubitka u dalekovodu koji zamjenjuje mrežu sistema. Prema tome u kritičnom razdoblju maksimalni gubitak snage iznosi

$$\Delta P_{mk}'' = \Delta P_{mk} + \Delta P_{msk} \tag{374}$$

gdje indeks s označuje da se radi o veličini, koja se odnosi na dalekovod koji zamjenjuje mrežu elektroenergetskog sistema. Poznavajući veličine k i β, posebno za promatrani dalekovod, a posebno za dalekovod koji zamjenjuje mrežu (k_s i β_s), a koje su u općem slučaju međusobno različite, možemo za ΔP_t (potrebno povećanje snage termoelektrana zbog ukupnih gubitaka) pisati

$$\Delta P_t = k\,\beta\,\Delta P_m + k_s\,\beta_s\,\Delta P_{ms} \tag{375}$$

Maksimalno opterećenje voda (P_{ms}), koji zamjenjuje mrežu, u općem slučaju razlikuje se od sume maksimalnih opetrećenja (P'_{ms})

vodova, koji su na njega priključeni, jer maksimalna opterećenja ne nastupaju istodobno. Omjer maksimalnog opterećenja voda i sume maksimalnih opterećenja označen je faktorom g, koji je definiran izrazom

$$g = \frac{P_{ms}}{P'_{ms}} = \frac{P_{ms}}{P'_m + P_m + \Delta P_m} \leqq 1 \tag{367}$$

ΔP_{ms} možemo, dakle, prema (297) — uzevši u obzir oznake na sl. 191 — prikazati izrazom

$$\Delta P_{ms} = \frac{F_s g^2}{q_s} (P'_m + P_m + \Delta P_m)^2 \tag{377}$$

Kvadriranjem izraza u zagradi jednadžbe (377), te zanemarenjem veličine ΔP^2_m, budući da je mala veličina drugog reda, u usporedbi sa sumom $P'_m + P_m$, dobivamo

$$\Delta P_{ms} = \frac{F_s g^2}{q_s} [(P'_m + P_m)^2 + 2 \Delta P_m (P'_m + P_m)] \tag{378}$$

Ako u (375) za ΔP_m uvrstimo vrijednost iz jednadžbe (297) a za ΔP_{ms} vrijednost iz (378), te ako deriviramo po q, dobivamo

$$\frac{d(\Delta P_t)}{dq} = -k \beta F \frac{P_m^2}{q^2} \left[1 + 2 \frac{k_s \beta_s}{k \beta} \frac{F_s}{q_s} g^2 (P'_m + P_m) \right] \tag{379}$$

Gubitke energije u prijenosnim vodovima možemo odrediti prema jednadžbi (308) posebno za promatrani dalekovod (ΔW), a posebno za dalekovod koji zamjenjuje mrežu (ΔW_s). Dakle ukupni gubici iznose

$$\Delta W'' = \Delta W + \Delta W_s \tag{380}$$

pa koristeći oznake za gubitak snage u (375) i jednadžbu (352) možemo pisati

$$\Delta W_t = t_o (\alpha \delta \Delta P_m + \alpha_s \delta_s \Delta P_{ms}) \tag{381}$$

Uzevši u obzir relaciju (378), dobivamo

$$\frac{d(\Delta W_t)}{dq} = -\alpha \delta t_o F \frac{P_m^2}{q^2} \left[1 + 2 \frac{\alpha_s \delta_s}{\alpha \delta} \frac{F_s}{q_s} g^2 (P'_m + P_m) \right] \tag{382}$$

Možemo — kao prvu aproksimaciju — postaviti, da je

$$k\,\beta = k_s\,\beta_s \tag{383}$$

$$\alpha\,\delta = \alpha_s\,\delta_s \tag{384}$$

Takva pretpostavka osniva se na činjenici, da su k i α u većoj mjeri ovisni o prilikama u sistemu, jer oba voda rade u istom sistemu, dok na β_s i δ_s utječu prilike u promatranom vodu. Taj utjecaj je to veći što je opterećenje P'_m manje u usporedbi s P_m, odnosno što je W' manje u usporedbi s W (sl. 191).

Ako još postavimo, da je

$$\gamma = 2\,\frac{F_s}{q_s}\,g^2\,(P'_m + P_m) \tag{385}$$

možemo uvjet troškova — analogno jednadžbi (367) — pisati u obliku

$$q^2\,\frac{dK_v}{dq} = F P_m^2\,(1+\gamma)\,(\varrho\,b_t\,k\,\beta + k_b\,\alpha\,\delta\,t_o) \tag{386}$$

koja se za faktor $(1+\gamma)$ razlikuje od izraza (367) koji vrijedi za slučaj kad pretpostavimo da je otpor mreže zanemarivo malen odnosno da je $q_s = \infty$.

Promotrimo još koliku vrijednost može imati veličina γ. Ovdje nas svakako interesira najveća vrijednost γ, koju dobivamo u slučaju dugog voda malog presjeka vodiča opterećenog maksimalnom snagom $(P'_m + P_m)$. Ako se radi o vodu napona 110 kV, možemo postaviti kao granične vrijednosti

$$l_s = 150 \text{ km}$$

$$q_s = 120 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$$

$$P_m' + P_m = 50 \text{ MW}$$

$$\cos\varphi_{2s} = 0{,}8$$

$$g = 1{,}00$$

pa dobivamo

$$F_s = \frac{l_s}{\lambda_s\,U^2\cos^2\varphi_{2s}} = \frac{150\cdot 10^3}{56\cdot 110^2\cdot 0{,}8^2} = 0{,}345 \tag{387 a}$$

te je

$$\gamma = 2\cdot 0{,}345\,\frac{50}{120} = 0{,}288$$

Prema tome utjecaj mreže prikazan je faktorom $1+\gamma = 1{,}288$. Budući da se na lijevoj strani jednadžbe (386) nalazi q^2, taj utjecaj u najne-

povoljnijem slučaju dovodi do povećanja optimalnog presjeka najviše za 13%, jer je $\sqrt{1{,}288} = 1{,}13$.

Za slučaj dalekovoda 220 kV možemo kao granični slučaj postaviti

$$l_s = 400 \text{ km}$$

$$q_s = 360 \text{ mm}^2 \text{ Al}$$

$$P'_m + P_m = 150 \text{ MW}$$

$$\cos \varphi_{2s} = 0{,}9$$

$$g = 1{,}00$$

pa dobivamo

$$F_s = \frac{k_R\, l_s}{\lambda_s\, U^2 \cos^2 \varphi_{2s}} = \frac{0{,}96 \cdot 400 \cdot 10^3}{36 \cdot 220^2 \cdot 0{,}9^2} = 0{,}272 \qquad (387\text{ b})$$

te je

$$\gamma = 2 \cdot 0{,}272 \frac{150}{360} = 0{,}227$$

što dovodi do povećanja presjeka od oko 11%.

Međutim u praktičnim slučajevima radit će se o vodovima manje duljine i većeg presjeka, koji nisu opterećeni do maksimalno moguće snage i koji zatvaraju zamke, pa će i veličina γ imati znatno manju vrijednost, što će još više opravdati zanemarenje utjecaja gubitaka u mreži na dimenzioniranje dalekovoda. Tako npr. ako pretpostavimo da se sabirnice, na koje je priključen promatrani dalekovod, napajaju dvama vodovima iste duljine i presjeka kao i ranije navedeni vodovi, ali s tim da se ukupna snaga podijeli na ta dva voda, povećanje presjeka iznosi za slučaj vodova 110 kV oko 7%, a za slučaj vodova 220 kV oko 6%.

Osim toga kad bi prihvatili i najveći mogući utjecaj gubitaka u mreži na određivanje optimalnog presjeka dalekovoda, izabrani se presjek vodiča dalekovoda u praksi ne bi promijenio, jer se normirani presjeci međusobno razlikuju za preko 20%.

Međutim ako se u nekom slučaju i radi o dimenzioniranju dalekovoda, koji je priključen na već postojeći vod velike duljine i relativno malog presjeka, potrebno je uzeti u obzir i utjecaj tog dalekovoda, što se može učiniti upotrebom jednadžba (379) i (382).

JEDANAESTO POGLAVLJE

OPTEREĆENJE VODOVA U ELEKTROENERGETSKOM SISTEMU

1. Općenito

Detaljniju analizu prilika u visokonaponskim mrežama teško je zamisliti bez izmjeničnog mrežnog analizatora. Međutim prije prijelaza na rad na samom analizatoru, potrebno je izvršiti opsežne pripremne radove, pogotovo, ako želimo proučavati prilike u nekoj mreži, čiji veći dio treba tek projektirati, te ako se radi o elektroenergetskom sistemu u kojem hidroelektrane igraju značajniju ulogu. U momentu pristupanja radu na analizatoru potrebno je naime imati sve podatke o djelatnom opterećenju svih elektrana, o potrošnji djelatne i jalove snage u svim čvorištima mreže, te o mogućnostima proizvodnje jalove snage za zadano djelatno opterećenje elektrana. U proizvodnji i potrošnji — koje moraju biti međusobno izjednačene — nisu uključeni gubici u mreži, koja će se ispitivati na analizatoru, pa je potrebno odrediti jednu ili više elektrana, koje imaju neiskorištene snage i koje će povećanjem opterećenja pokriti gubitke u mreži.

Da bismo mogli odrediti sve te podatke, potrebno je provesti detaljniju analizu prilika u elektroenergetskom sistemu poznavajući karakteristike elektrana (a pogotovo hidroelektrana), te karakteristike potrošnje.

2. Djelatno opterećenje vodova

Na način opisan u poglavlju IV možemo odrediti mogućnost iskorištenja snage i energije iz hidroelektrana, te potrebno opterećenje i proizvodnju termoelektrana u elektroenergetskom sistemu kao cjelini. Takve elektroenergetske bilance izrađene za cijeli sistem služe kao osnova za određivanje opterećenja vodova.

Poznavajući potrebe energije i snage, te mogućnosti proizvodnje hidroelektrana u svakom od područja, na koja je podijeljen promatrani elektroenergetski sistem, mogu se — kao i za elektroenergetski sistem kao cjelinu — odrediti razlike između potreba i mogućnosti proizvodnje hidroelektrana. U tab. 30 i 31 prikazane su te razlike za dva slučaja, za koje su u tab. 29 prikazane bilance za sistem kao cjelinu. Pretpostavljeno je, da je promatrani sistem podijeljen na četiri područja. U područjima *A*, *B* i *C* postoje hidroelektrane (hidroelektrane u pod-

ručjima *A* i *C* imaju akumulacione bazene, a hidrolektrana u području *B* je protočna hidroelektrana), dok u područjima *B* i *D* postoje termoelektrane (s maksimalnom snagom na pragu od 36 odnosno 64 MW). Pretpostavljeno je, osim toga, da termoelektrana u području *D* ima manje specifične promjenljive troškove.

Ravnoteža proizvodnje i potrošnje u sistemu kao cjelini postignuta je prebacivanjem energije i snage hidroelektrana iz jednog u drugi dio dijagrama opterećenja, nekorištenjem dijela energije i snage hidroelektrana, te angažiranjem termoelektrana. Sve je to učinjeno za sistem kao cjelinu bez obzira u kojoj će se hidroelektrani provesti korekture i koja će termoelektrana biti angažirana. Pod korekturama u hidroelektranama razumijevamo promjene izvršene u hidroelektranama bilo da su posljedica prebacivanja bilo da su posljedica nekorištenja energije odnosno snage.

Ako hoćemo međutim odrediti prilike u pojedinim područjima, potrebno je podijeliti korekture hidroelektrana i angažirati termoelektrane po područjima. To je vrlo osjetljiva faza rada, jer o njoj može da ovisi rezultat i potreba prijenosa. Ako se pak hoće postići rezultat,

Tab. 29. Primjeri bilanca snaga i energija nekog elektroenergetskog sistema (slučaj a i slučaj b).

	Slučaj a		Slučaj b	
	W	P	W	P
Ukupno				
hidroelektrane	93,8	220,0	152,4	240,0
potrebe	130,0	230,0	130,0	230,0
razlika	—36,2	—10,0	+22,4	+10,0
Varijabilni dio				
hidroelektrane	50,0	160,0	21,0	60,0
potrebe	25,1	86,3	25,1	86,3
razlika	+24,9	+73,7	— 4,1	—26,3
iz konstantnog dijela		—	+ 4,1	+26,3
u konstantni dio	—24,9	—34,1	—	—
termoelektrane	—	—	—	—
neiskorišteno HE	—	—39,6	—	—
Konstantni dio				
hidroelektrane	43,8	60,0	131,4	180,0
potrebe	104,9	143,7	104,9	143,7
razlika	—61,1	—83,7	+26,5	+36,3
iz varijabilnog dijela	+24,9	+34,1	—	—
u varijabilni dio	—	—	— 4,1	—26,3
termoelektrane	+36,2	+49,6	—	—
neiskorišteno HE	—	—	—22,4	—10,0
ukupno termoelektrane	36,2	49,6	—	—
ukupno neiskorišteno	—	39,6	22,4	10,0

Tab. 30. *Primjer bilanca snaga i energija za četiri područja elektroenergetskog sistema (slučaj a na tab.* 29).

Slučaj *a*

	Područje *A*		Područje *B*		Područje *C*		Područje *D*	
	W	*P*	*W*	*P*	*W*	*P*	*W*	*P*
Ukupno								
hidroelektrane	40,0	120,0	29,2	+ 40,0	24,6	60,0	—	—
potrebe	10,0	20,0	27,0	50,0	40,0	60,0	53,0	100,0
razlika	+ 30,0	+ 100,0	+ 2,2	— 10,0	— 15,4	—	— 53,0	— 100,0
Varijabilni dio								
hidroelektrane	40,0	120,0	—	—	10,0	40,0	—	—
potrebe	2,7	10,0	6,9	22,5	5,0	12,0	10,5	41,8
razlika	+ 37,3	+ 110,0	— 6,9	— 22,5	+ 5,0	+ 28,0	— 10,5	— 41,8
korektura	— 24,9	— 73,7	—	—	—	—	—	—
korigirana razlika	+ 12,4	+ 36,3	— 6,9	— 22,5	+ 5,0	+ 28,0	— 10,5	— 41,8
termoelektrane	—	—	—	—	—	—	—	—
bilanca područja	+ 12,4	+ 36,3	— 6,9	— 22,5	+ 5,0	+ 28,0	— 10,5	— 41,8
Konstantni dio								
hidroelektrane	—	—	29,2	40,0	14,6	20,0	—	—
potrebe	7,3	10,0	20,1	27,5	35,0	48,0	42,5	58,2
razlika	— 7,3	— 10,0	+ 9,1	+ 12,5	— 20,4	— 28,0	— 42,5	— 58,2
korektura	+ 24,9	+ 34,1	—	—	—	—	—	—
korigirana razlika	+ 17,6	+ 24,1	+ 9,1	+ 12,5	— 20,4	— 28,0	— 42,5	— 58,2
termoelektrane	—	—	—	—	—	—	+ 36,2	+ 49,6
bilanca područja	+ 17,6	+ 24,1	+ 9,1	+ 12,5	— 20,4	— 28,0	— 6,3	— 8,6

Tab. 31. *Primjer bilanca snaga i energija za četiri područja elektroenergetskog sistema (slučaj b na tab.* 29*).*

Slučaj *b*

	Područje *A*		Područje *B*		Područje *C*		Područje *D*	
	W	*P*	*W*	*P*	*W*	*P*	*W*	*P*
Ukupno								
hidroelektrane	82,0	120,0	43,8	60,0	26,6	60,0	—	—
potrebe	10,0	20,0	27,0	50,0	40,0	60,0	53,0	100,0
razlika	+ 72,0	+ 100,0	+ 16,8	+ 10,0	— 13,4	—	— 53,0	— 100,0
Varijabilni dio								
hidroelektrane	9,0	20,0	—	—	12,0	40,0	—	—
potrebe	2,7	10,0	6,9	22,5	5,0	12,0	10,5	41,8
razlika	+ 6,3	+ 10,0	— 6,9	— 22,5	+ 7,0	+ 28,0	— 10,5	— 41,8
korektura	+ 4,1	+ 26,3	—	—	—	—	—	—
korigirana razlika	+ 10,4	+ 36,3	— 6,9	— 22,5	+ 7,0	+ 28,0	— 10,5	— 41,8
termoelektrane	—	—	—	—	—	—	—	—
bilanca područja	+ 10,4	+ 36,3	— 6,9	— 22,5	+ 7,0	+ 28,0	— 10,5	— 41,8
Konstantni dio								
hidroelektrane	73,0	100,0	43,8	60,0	14,6	20,0	—	—
potrebe	7,3	10,0	20,1	27,5	35,0	48,0	42,5	58,2
razlika	+ 65,7	+ 90,0	+ 23,7	+ 32,5	— 20,4	— 28,0	— 42,5	— 58,2
korektura	— 26,5	— 36,3	—	—	—	—	—	—
korigirana razlika	+ 39,2	+ 53,7	+ 23,7	+ 32,5	— 20,4	— 28,0	— 42,5	— 58,2
termoelektrane	—	—	—	—	—	—	—	—
bilanca područja	+ 39,2	+ 53,7	+ 23,7	+ 32,5	— 20,4	— 28,0	— 42,5	— 58,2

koji je što bliže prilikama, koje će se ostvariti u praktičnom pogonu, treba voditi računa o slijedećem:

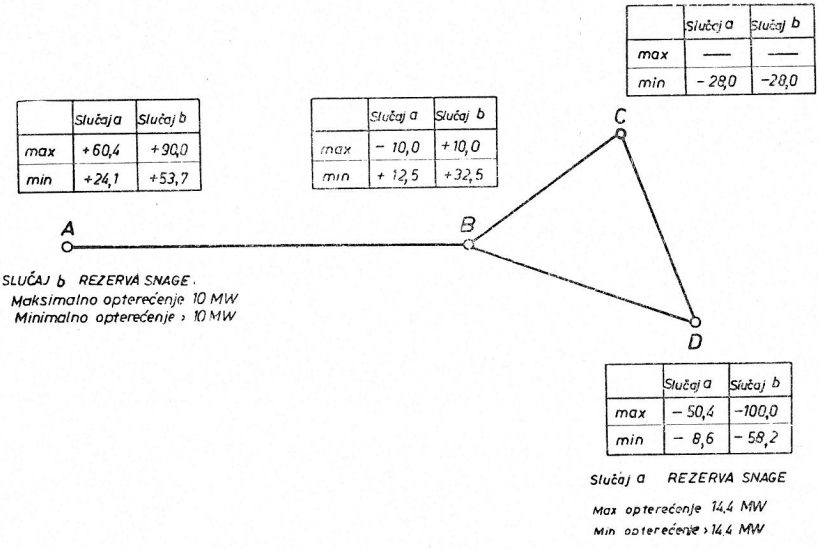
— prebacivanje energije iz jednog u drugi dio dijagrama opterećenja može se vršiti samo onda ako u promatranom području postoje viškovi takve energije, koju treba prebaciti;

— nekorištenje energije (preljevi) i snage predvidjeti u onim područjima u kojima postoje viškovi energije odnosno snage i koji su daleko od područja u kojima se pojavljuju manjkovi energije odnosno snage;

— prilikom donošenja odluke o nekorištenju dijela varijabilne snage hidroelektrane voditi računa o mogućnostima plasmana varijabilne energije s preostalom varijabilnom snagom;

— redoslijed angažiranja termoelektrana predvidjeti prema specifičnim troškovima.

Uzevši sve to u obzir moguće je jednoznačnije podijeliti korekture hidroelektrana i termoelektrana na područja, pa na taj način doći do bilanca područja, koje su prikazane za dva promatrana slučaja u tab. 30 i 31.



Sl. 192. Primjer sheme mreže sa oznakom viška i manjka snage u momentu maksimalnog i minimalnog opterećenja (prema tab. 32 i 33).

Podaci o viškovima i manjkovima varijabilne i konstantne energije i snage još ne daju podatke potrebne za analizu prilika u mreži, ali daju podatke na osnovu kojih jednostavno dolazimo do opterećenja u razdoblju velikih i malih opterećenja. Višak ili manjak snage u razdoblju velikih opterećenja ujedno je višak ili manjak snage u momentu

Tab. 32. Primjer bilance snaga i energija za četiri područja u razdoblju velikih i malih opterećenja (za slučaj a prema tab. 30).

Slučaj *a*

	Područje *A*		Područje *B*		Područje *C*		Područje *D*	
	W	*P*	*W*	*P*	*W*	*P*	*W*	*P*
Razdoblje velikih opterećenja								
varijabilni dio	+ 12,4	+ 36,3	— 6,9	— 22,5	+ 5,0	+ 28,0	— 10,5	— 41,8
dio konstantnog dijela	+ 10,8	+ 24,1	+ 5,6	+ 12,5	— 12,5	— 28,0	— 3,9	— 8,6
ukupno	+ 23,2	+ 60,4	— 1,3	— 10,0	— 7,5	—	— 14,4	— 50,4
Razdoblje malih opterećenja								
dio konstantnog dijela	+ 6,8	+ 24,1	+ 3,5	+ 12,5	— 7,9	— 28,0	— 2,4	— 8,6

Tab. 33. Primjer bilance snaga i energija za četiri područja u razdoblju velikih i malih opterećenja (za slučaj b prema tab. 31).

Slučaj *b*

	Područje *A*		Područje *B*		Područje *C*		Područje *D*	
	W	*P*	*W*	*P*	*W*	*P*	*W*	*P*
Razdoblje velikih opterećenja								
varijabilni dio	+ 10,4	+ 36,3	— 6,9	— 22,5	+ 7,0	+ 28,0	— 10,5	— 41,8
dio konstantnog dijela	+ 24,1	+ 53,7	+ 14,6	+ 32,5	— 12,5	— 28,0	— 26,1	— 58,2
ukupno	+ 34,5	+ 90,0	+ 7,7	+ 10,0	— 5,5	—	— 36,6	—100,0
Razdoblje malih opterećenja								
dio konstantnog dijela	+ 15,1	+ 53,7	+ 9,1	+ 32,5	— 7,9	— 28,0	— 16,4	— 58,2

maksimalnog opterećenja sistema. Taj višak ili manjak snage određuje se kao suma viškova ili manjkova snage u varijabilnom i konstantnom dijelu dijagrama opterećenja uzevši u obzir predznak snage. Višak ili manjak konstantne snage ujedno je višak ili manjak u razdoblju malih opterećenja odnosno u momentu minimalnog opterećenja. I energiju možemo podijeliti na razdoblje velikih i malih opterećenja. Sva varijabilna energija pripada razdoblju velikih opterećenja, dok se konstantna energija dijeli na razdoblje velikih i malih opterećenja prema trajanju tih razdoblja.

Tab. 32 i 33 prikazuju bilance područja u razdoblju velikih i malih opterećenja, dok sl. 192 daje pregled o viškovima i manjkovima snage u momentu maksimalnih i minimalnih opterećenja sistema za dva promatrana slučaja. Na sl. 192 označene su uz pojedina područja i za oba slučaja rezerve snage, koje treba angažirati za pokrivanje gubitaka u mreži, koji se mogu odrediti tek mjerenjem na mrežnom analizatoru.

Treba napomenuti da se u nekim slučajevima — kad se u nekom području pojavljuje vrlo veliko ili vrlo malo iskorištenje varijabilne snage hidroelektrana — može dogoditi da maksimalno opterećenje dalekovoda, koji povezuju to područje sa sistemom, ne nastupa ni u momentu maksimalnog ni u momentu minimalnog opterećenja sistema. U tom slučaju, ako se očekuje da će tada biti postignuto najveće opterećenje promatranog dalekovoda uzevši u obzir sva analizirana stanja u sistemu, potrebno je provesti detaljniju analizu upotrijebivši krivulje trajanja potražnje i opterećenja pojedinih elektrana uz zahtjev, da se krivulje trajanja opterećenja elektrana što bolje prilagode krivuljama trajanja potražnje.

Opisani način određivanja opterećenja čvorova mreže, koji je prikazan za jednostavan slučaj, a može se upotrijebiti i za velike mreže, treba upotrijebiti za elektroenergetske sisteme u kojima je udio hidroelektrana u ukupnoj proizvodnji električne energije značajan. Nasuprot tome u elektroenergetskim sistemima, u kojima veliki dio od ukupne proizvodnje otpada na termoelektrane, dovoljna je analiza prilika samo na osnovu snaga u momentu maksimalnog i u momentu minimalnog opterećenja.

U sistemu sa značajnim udjelom termoelektrana sve karakteristične situacije u prijenosnoj mreži bit će iscrpljene, ako se uzmu u razmatranje prilike u periodu najvećih i najmanjih opterećenja. To međutim nije slučaj za sisteme u kojima je udio hidroelektrana značajan. Tada će biti potrebno potražiti karakteristične situacije i prema ukupnom opterećenju sistema (razdoblje najvećih i najmanjih maksimalnih opterećenja) i prema mogućoj proizvodnji hidroelektrana (razdoblje vrlo velikih i vrlo malih proizvodnja hidroelektrana). U nekim slučajevima treba ići i dalje. Ako naime u elektroenergetskom sistemu postoje npr. dva područja s hidroelektranama različitih karakteristika, treba osim navedenih karakterističnih stanja odabrati

i takova u kojima se u jednom području pojavljuje velika proizvodnja u hidroelektranama, a u drugom području istodobno mala proizvodnja, i obrnuto.

Treba dalje napomenuti da se obično najteže prilike s obzirom na prijenos pojavljuju u razdoblju velikih voda, jer su hidroelektrane najčešće više udaljene od konzumnih centara nego termoelektrana, i jer se nastoji da se do krajnje granice smanje preljevi u hidroelektranama.

Konačno treba naglasiti da nije u svim slučajevima potrebno provesti analizu za sva područja (npr. sva čvorišta mreže 110 i 220 kV) u elektroenergetskom sistemu. Ako se naime istražuje samo dio mreže, cijeli sistem treba podijeliti na onoliki broj područja, koliko ih je potrebno da bi se prikazao promatrani dio mreže. U tom slučaju veliki dio mreže može se promatrati kao jedno područje, ako se razmatra veza tog dijela mreže s ostalim elektroenergetskim sistemom. Na taj način dolazimo do pojednostavnjenja razmatranja.

3. Jalovo opterećenje vodova

Zadatak za analizu na mrežnom izmjeničnom analizatoru nije potpun ako su određene samo djelatne snage, već je potrebno odrediti i potrebne jalove snage kao i granice mogućnosti proizvodnje jalove snage u pojedinim područjima. Potreba jalove snage za potrošače u času maksimalnog i minimalnog opterećenja definirana je djelatnim opterećenjem i faktorom snage. Mogućnost proizvodnje jalove snage ne može se definirati na isti način kao mogućnost proizvodnje djelatne snage, jer s jedne strane mogućnost proizvodnje direktno ne ovisi o raspoloživom dotoku u hidroelektrani ni o potrebi dopune termoelektranama, dok s druge strane raspodjela proizvodnje jalove snage među elektranama ovisi i o naponskim prilikama. Radi toga potrebno je odrediti tek granice mogućnosti proizvodnje jalove snage, pa te granice postaviti kao podatak mjerodavan za rad na analizatoru.

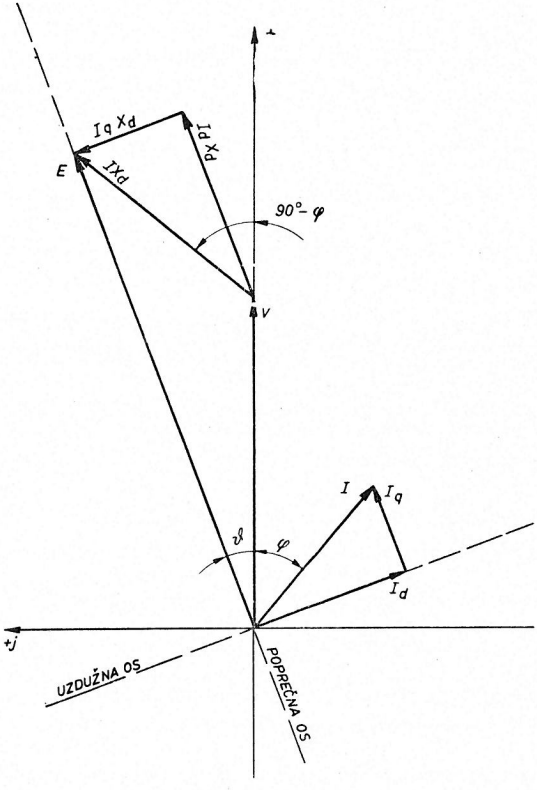
Granice proizvodnje jalove snage elektrane ovise osim o karakteristikama generatora (reaktancije, nazivni faktor snage, opseg regulacije napona uz nazivnu prividnu snagu) još i o djelatnom opterećenju generatora kao i o broju agregata koji se nalaze u pogonu.

a) Granice opterećenja generatora

α) Dijagrami snaga

Pođimo od naponskog dijagrama turbogeneratora (sl. 193). Pretpostavimo da struja I zaostaje za naponom V na stezaljkama generatora za kut φ. Ako zanemarimo djelatni otpor generatora, što možemo učiniti bez veće pogreške, pad napona u sinhronoj reaktanciji $I X_d$ je okomit na vektor struje, pa je zbrojem napona na stezaljkama i pada napona određen vektor uzbude E. Uzbuda E je napon koji bi se pojavio na stezaljkama generatora kad bi u promatranom slučaju

struja postala $I = 0$. Budući da inducirani napon za 90° zaostaje za magnetskim tokom, uzdužna os je okomita na vektor uzbude E, pa poprečna os pada u vektor E. Definiranjem uzdužne i poprečne osi može se i struja I rastaviti na uzdužnu I_d i poprečnu I_q komponentu, pa i pad napona možemo podijeliti na pad napona uzdužne komponente struje kroz uzdužnu sinhronu reaktanciju X_d i pad napona

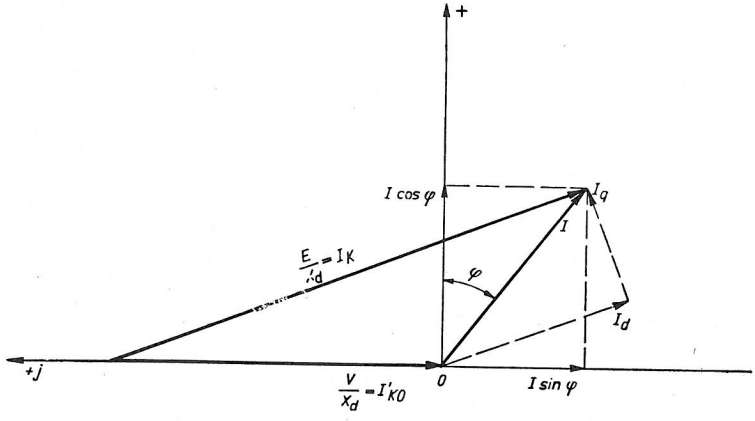


Sl. 193. Naponski vektorski dijagram turbogeneratora

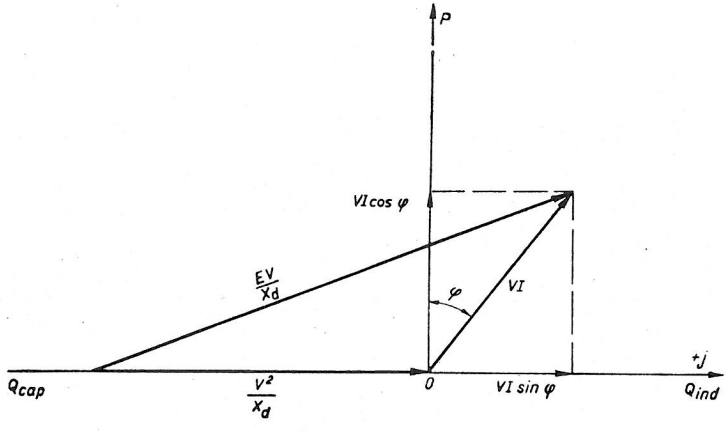
poprečne komponente struje kroz poprečnu sinhronu reaktanciju X_q. Buduci da je $X_q = X_d$, padovi napona su $I_d X_d$ i $I_q X_d$.

Ako sada sve napone u naponskom dijagramu podijelimo sa sinhronom reaktancijom jX_d — što znači množenje sa $-j\frac{1}{X_d}$ — dobivamo strujni vektorski dijagram (sl. 194). U naponskom vektorskom dijagramu napon V pada (sl. 193) u realnu os i ima pozitivni

smjer, pa će množenjem s — j pasti u imaginarnu os, te će imati negativan smjer (sl. 194). Time je definiran pozitivan smisao imaginarne, a prema tome i realne osi. Dijeljenjem V s X_d dobivamo struju I'_{ko} pomoću koje je definirana sinhrona reaktancija [33], a dijeljenjem uzbude E s X_d dobivamo struju kratkog spoja, koja bi protekla kroz generator u slučaju kratkog spoja na priključnicama, kad bi generator



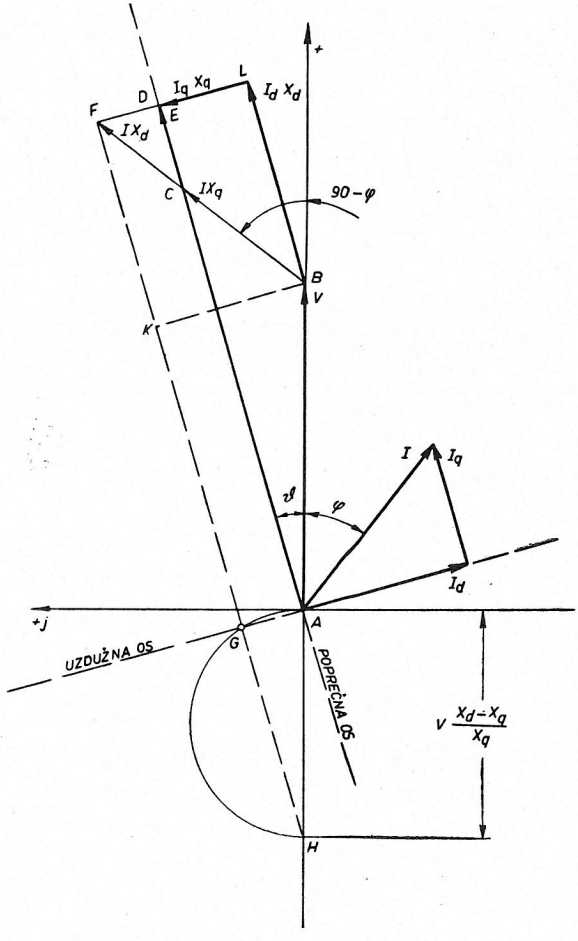
Sl. 194. Strujni vekotrski dijagram turbogeneratora



Sl. 195. Vektorski dijagram snaga turbogeneratora

u praznom hodu imao napon E na priključnicama. Zbroj struja I'_{ko} i struje opterećenja I upravo je jednak struji I_k. Projekcijom struje opterećenja na realnu i imaginarnu os dolazimo do realne i imaginarne komponente struje, jer je kut između struje I i realne osi upravo fazni pomak struje prema naponu. Kut između napona V i pada napona $I X_d$ (na sl. 193) je naime komplement kuta φ.

Množenjem konjugirano kompleksnog izraza za struju s naponom V na priključnicama generatora, dobivamo snagu na priključnicama. Budući da napon na stezaljkama pretpostavljamo konstantnom veličinom, vektorski dijagram snaga, do kojeg dolazimo množenjem s naponom, ima isti oblik kao i dijagram struja, a jedina je razlika pozitivni smisao imaginarne osi (sl. 195). Sada vektor VI prikazuje prividnu



Sl. 196. Naponski vektorski dijagram generatora s izrazitim polovima

snagu, koju daje jedna faza generatora, dok su projekcije na koordinatne osi djelatna snaga i jalova snaga (induktivna u pozitivnom smislu, a kapacitivna u negativnom smislu imaginarne osi).

Isti postupak kao za turbogenerator možemo primijeniti za generator s izrazitim polovima. Pođimo opet od naponskog vektorskog dijagrama (sl. 196). Da odredimo smjer uzbude, dodat ćemo naponu V pad napona $I X_q$, pa ćemo odrediti tačku C kroz koju prolazi vektor uzbude E. Uzbuda, koja odgovara dužini AC, bila bi dovoljna kad bi i uzdužna sinhrona reaktancija bila jednaka X_q. Budući da je $X_d > X_q$, potrebna je veća uzbuda, koju je moguće odrediti rastavljanjem struje na uzdužnu i poprečnu komponentu, tek nakon što je određen smjer vektora E. Uzdužna komponenta struje prouzrokuje pad napona u uzdužnoj sinhronoj reaktanciji $I_d X_d$, a poprečna komponenta struje u poprečnoj reaktanciji $I_q X_q$, pa dodavanjem ovih padova napona naponu na priključnicama, dobivamo potrebnu uzbudu E. Korisno je—kako će se kasnije vidjeti—prikazati uzbudu dužinom FG koja je paralelna s vektorom uzbude E, a kojoj se tačka F nalazi na kraju vektora BF, koji prikazuje pad napona $I X_d$. Produljenje dužine FG siječe realnu os u tački H, a dužina AH je

$$\overline{AH} = V \frac{X_d - X_q}{X_q} \tag{388}$$

do čega dolazimo iz razmjera

$$\overline{AH} : (V + \overline{AH}) = \overline{AG} : \overline{BK} \tag{389}$$

ako uzmemo u obzir da je

$$\overline{AG} = I_q (X_d - X_q) \tag{390}$$

a

$$\overline{BK} = I_q X_d \tag{391}$$

Budući da je dužina AH neovisna o struji I i o faznom pomaku, te budući da su dužine AG i HG međusobno okomite. tačka G se uvijek nalazi na polukrugu promjera AH.

Dijeljenjem s jX_d dolazimo i sada do strujnog dijagrama (sl. 197). Vektor struje opterećenja sada ne spaja struju $I'_{ko} = V/X_d$ i struju $I_k = E/X_d$, koje imaju zajedničku tačku A. Razlog treba tražiti u činjenici da je sada za istu struju potrebna manja uzbuda nego kod turbogeneratora radi manje poprečne reaktancije. To smanjenje uzbude prikazuje vektor FD, odnosno $I_q (X_d - X_q)$ u naponskom dijagramu (sl. 196) ili vektor

$$I_q \frac{X_d - X_q}{X_d}$$

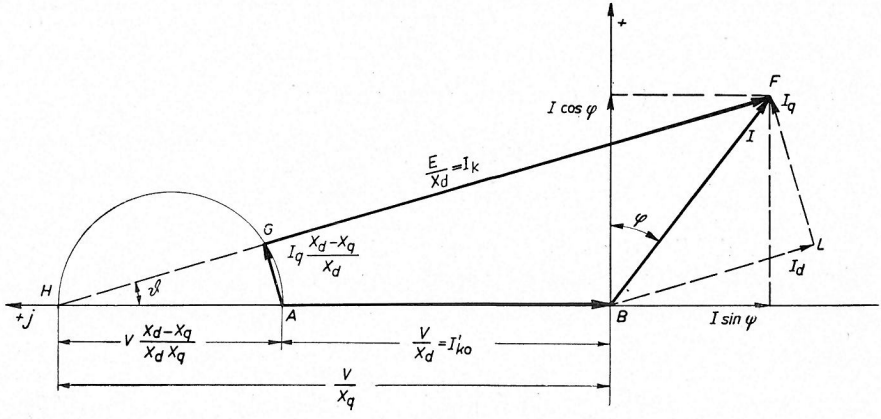
u strujnom dijagramu. To smanjenje odgovara vektoru AG i u naponskom i u strujnom dijagramu.

Množenjem veličina u strujnom dijagramu s naponom V dolazimo do dijagrama snaga (sl. 198).

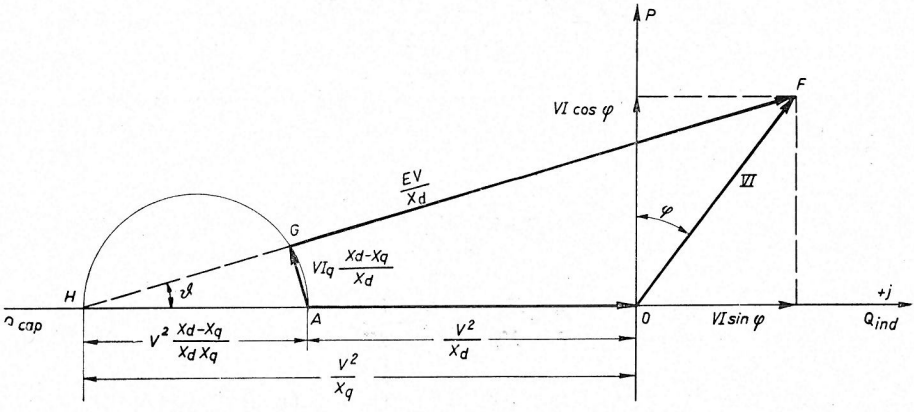
Polazeći od napcnskog vektorskog dijagrama za generator s izrazitim polovima (sl. 196), možemo postaviti jednadžbe za struju i napon

$$I = I_q - jI_d \tag{392}$$

$$V = V\cos\vartheta - jV\sin\vartheta \tag{393}$$



Sl. 197. Strujni vektorski dijagram generatora s izrazitim polovima



Sl. 198. Vektorski dijagram snaga generatora s izrazitim polovima

Ako napon, uzbudu i padove napona jednom projiciramo na poprečnu, a drugi put na uzdužnu os, dobivamo

$$E = V \cos \vartheta + I_d X_d \tag{394}$$

$$O = V \sin \vartheta - I_q X_q \tag{395}$$

pa iz gore navedenih jednadžbi možemo izračunati komponente struje

$$I_d = \frac{E - V \cos \vartheta}{X_d} \tag{396}$$

$$I_q = \frac{V \sin \vartheta}{X_q} \tag{397}$$

Uvrštavanjem u (392) dobivamo izraz za struju

$$I = \frac{V \sin \vartheta}{X_q} - j \frac{E - V \cos \vartheta}{X_d} \tag{398}$$

Da dobijemo prividnu snagu, treba napon (393) pomnožiti s konjugirano kompleksnim izrazom za struju (398), pa realni dio predstavlja djelatnu, a imaginarni dio jalovu snagu. Za djelatnu snagu dobivamo

$$P = \frac{EV}{X_d} \sin \vartheta + \frac{V^2}{2} \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \cdot \sin (2 \vartheta) \tag{399}$$

a za jalovu snagu

$$Q = \frac{EV}{X_d} \cos \vartheta - \frac{V^2}{2} \frac{X_d + X_q}{X_d X_q} + \frac{V^2}{2} \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \cos (2 \vartheta) \tag{400}$$

Gore navedene jednadžbe vrijede za generator s izrazitim polovima. Da dobijemo izraze koji vrijede za turbogenerator, treba postaviti $X_q = X_d$, pa dobivamo

$$P = \frac{EV}{X_d} \sin \vartheta \tag{401}$$

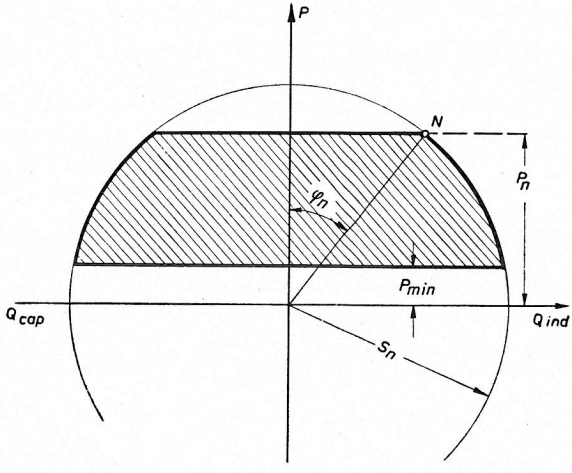
$$Q = \frac{EV}{X_d} \cos \vartheta - \frac{V^2}{X_d} \tag{402}$$

Kako je već naglašeno, jednadžbe (399) i (400), a prema tomu i jednadžbe (401) i (402), prikazuju snagu jedne faze, pa da dobijemo snagu koja vrijedi za trofazni generator treba desne strane množiti s tri. Možemo međutim postupiti još jednostavnije, da sve račune provedemo pomoću spomenutih jednadžba, a tek konačni rezultat pomnožiti s tri. Takav postupak praktički znači da se odnosi u gene-

ratoru prikažu vektorskim dijagramima snaga (sl. 195 i 198), ali da se snage P i Q očitavaju na skalama trostruke snage.

β) *Konstrukcija pogonske karte*

Pogonska karta generatora prikazuje prilike u generatoru u stacionarnom pogonu uz pretpostavku da na priključnicama generatora vlada konstantan napon. Pogonska karta generatora ucrtana



Sl. 199. Ograničenje opterećivanja generatora radi pogonskog stroja i ugrijavanja statora

je u koordinatnom sistemu snaga, pa ona pokazuje i granice opterećenja generatora uzimajući u obzir i djelatno i jalovo opterećenje generatora.

Granica ugrijavanja statora određena je nazivnom strujom I_n. Uz pretpostavku da na priključnicama generatora vlada nazivni napon V_n, ograničenje opterećenja radi ugrijavanja statora određeno je produktom $V_n I_n$, što predstavlja trećinu nazivne snage generatora odnosno nazivnu snagu jedne faze generatora. Toliku snagu — s obzirom na ugrijavanje statora — može dati generator bez obzira na to kakav je odnos između djelatne i jalove snage. Ako je $S_n = V_n I_n$, može se granica opterećenja prikazati jednadžbom

$$S_n^2 = P^2 + Q^2 \tag{403}$$

dakle granica opterećenja je radi ugrijavanja statora krug polumjera S_n sa središtem u ishodištu koordinatnog sistema snaga (sl. 199).

Generator se može dakle opteretiti — s obzirom na ugrijavanje bakra statora — onom snagom, čija tačka u koordinatnom sistemu snaga pada unutar ili na rub kruga s polumjerom S_n.

Za razmatranje sinhronog stroja kao generatora od značenja je ona polovina kruga koja ima pozitivne djelatne snage, jer druga polovina kruga predstavlja motorno područje.

Djelatna snaga koju generator može da proizvede ovisi o pogonskom stroju, pa je maksimalna djelatna snaga jedne faze na priključnicama definirana izrazom

$$P_n = V_n I_n \cos \varphi_n \tag{404}$$

gdje su V_n nazivni napon, I_n nazivna struja, $\cos \varphi_n$ nazivni faktor snage. Snaga P_n je maksimalna snaga jedne faze naravno samo onda ako se radi o generatoru koji je građen upravo za pogonski stroj, koji ga stvarno tjera. Tada je sjecištem pravca P_n = konst. i kruga s polumjerom S_n u induktivnom području definirana tačka nazivnog opterećenja generatora (tačka N na sl. 199).

U nekim slučajevima pogonski stroj ne može da radi, ako je opterećen s manjom snagom od neke minimalne snage (tehnički minimum), pa i to predstavlja ograničenje opterećenja radi pogonskog stroja. To je ograničenje prikazano pravcem paralelnim s apscisom ($P_{\min}$), pa šrafirana površina na sl. 199 predstavlja moguće područje rada generatora s obzirom na ugrijavanje statora i s obzirom na pogonski stroj.

Tački nazivnog opterećenja generatora N odgovara i nazivni faktor snage generatora $\cos \varphi_n$.

Da se odredi jednadžba krivulje konstantne uzbude, odredimo najprije sjecište pravca ϑ = konst. s apscisom. Iz jednadžbe za P (399) određujemo najprije veličinu E

$$E = \frac{X_d}{V \sin \vartheta} \left[P - \frac{V^2}{2} \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \sin (2 \vartheta) \right] \tag{405}$$

pa tu vrijednost uvrstimo u (400). Dobivamo

$$Q = P \operatorname{cotg} \vartheta - \frac{V^2}{X_q} \tag{406}$$

što predstavlja pravac za svaki ϑ = konst. Svi pravci ϑ = konst. sijeku se na osi apscise, a sjecište je određeno s $P = 0$, pa je

$$Q_o = -\frac{V^2}{X_q} \tag{407}$$

što vrijedi za generator s izrazitim polovima. Za generator s turborotorom vrijedi $X_q = X_d$, pa je

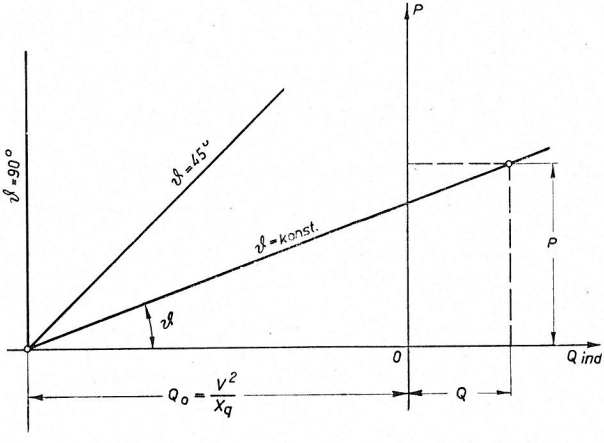
$$Q_o = -\frac{V^2}{X_d} \tag{408}$$

Pravci za ϑ = konst. prikazani su na sl. 200 za generator s izrazitim polovima, a na sl. 201 za generator s turborotorom.

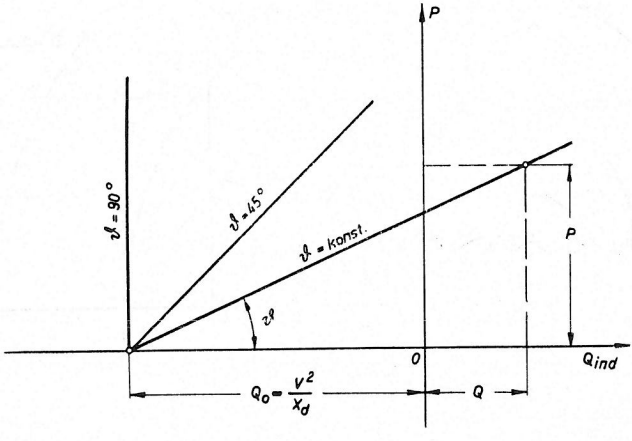
Za bilo koje opterećenje, kako za generator s izrazitim polovima tako za turbogenerator, možemo postaviti

$$\sin\vartheta = \frac{P}{\sqrt{P^2+(Q-Q_0)^2}} \tag{409}$$

$$\cos\vartheta = \frac{Q-Q_0}{\sqrt{P^2+(Q-Q_0)^2}} \tag{410}$$



Sl. 200. Pravci ϑ = konst. za generator s izrazitim polovima



Sl. 201. Pravci ϑ = konst. za turbogenerator

pa uvrštavanjem vrijednosti za $\sin\vartheta$ i $\cos\vartheta$ u jednadžbu (399) dobivamo

$$[P^2+(Q-Q_0)^2]^2-$$
$$-[P^2+(Q-Q_0)^2]\left[\left(\frac{EV}{X_d}\right)^2+2V^2\frac{X_d-X_q}{X_dX_q}(Q-Q_0)\right]+$$
$$+V^4\left(\frac{X_d-X_q}{X_dX_q}\right)^2(Q-Q_0)^2=0 \tag{411}$$

Izraz (411) predstavlja jednadžbu krivulje u koordinatnom sistemu snaga za $E=$ konst, jer su sve ostale veličine za promatrani generator konstantne (V, X_d, X_q i Q_0).

Postavi li se $E=0$ u (411), a nakon stezanja u kvadrat binoma, dolazi se do jednadžbe

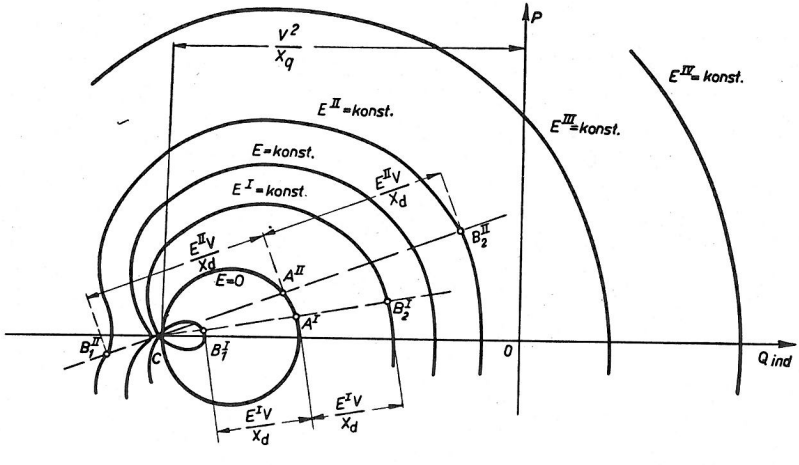
$$P^2+(Q-Q_0)^2-V^2\frac{X_d-X_q}{X_dX_q}(Q-Q_0)=0 \tag{412}$$

Proširenjem s

$$\frac{V^4}{4}\left(\frac{X_d-X_q}{X_dX_q}\right)^2 \tag{413}$$

dolazimo do izraza

$$P^2+\left(Q+\frac{V^2}{2}\frac{X_d+X_q}{X_dX_q}\right)^2=\frac{V^4}{4}\left(\frac{X_d-X_q}{X_dX_q}\right)^2 \tag{414}$$



Sl. 202. Krivulje konstantne uzbude i njihova konstrukcija za generator s izrazitim polovima

koji predstavlja kružnicu s koordinatama središta

$$p = 0 \tag{415 a}$$

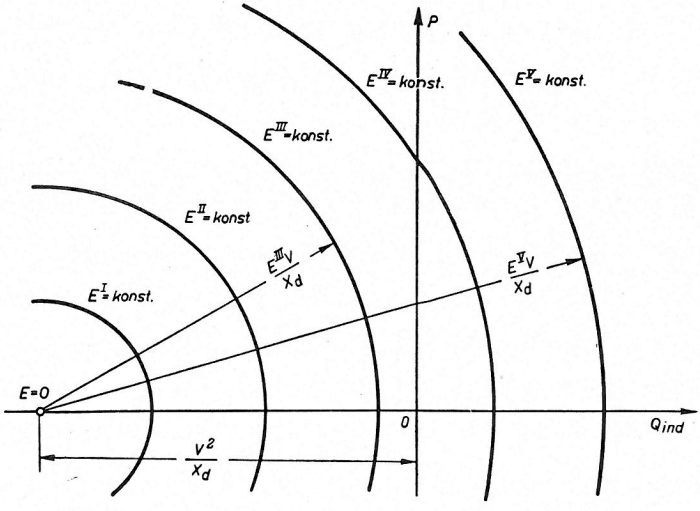
$$q = -\frac{V^2}{2}\frac{X_d + X_q}{X_d X_q} \tag{415 b}$$

i s polumjerom

$$r = \frac{V^2}{2}\frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \tag{416}$$

Ovaj krug jednak je s krugom koji je ucrtan u dijagram na sl. 198.

U slučaju $E \neq 0$ konstrukcija krivulja za $E =$ konst. prikazana je na sl. 202. Promotrimo konstrukciju krivulje, koja odgovara uzbudi E''.



Sl. 203. Kružnice konstantne uzbude za turbogenerator

Ucrtajmo najprije kružnicu za $E = 0$ prema (415) i (416), a zatim povucimo pravac za $\vartheta =$ konst, koji siječe os apscisu u tački C, a kružnicu za $E = 0$ u tački A''. Odredivši tačke B''_1 i B''_2 koje su za E''. V/X_d udaljene od A'', a leže na pravcu za $\vartheta =$ konst, određene su dvije tačke na krivulji $E'' =$ konst. Postupajući na isti način, ali za druge pravce $\vartheta =$ konst. možemo konstruirati krivulju $E'' =$ konst.

Za turbogenerator, kad je $X_d = X_q$, jednadžba (411) prelazi u oblik

$$P^2 + (Q - Q_0)^2 = \frac{E^2 V^2}{X_d^2} \tag{417}$$

pa su krivulje konstantne uzbude koncentrične kružnice s koordinatama središta

$$p = 0 \tag{418 a}$$

$$q = -\frac{V^2}{X_d} \tag{418 b}$$

a s polumjerom

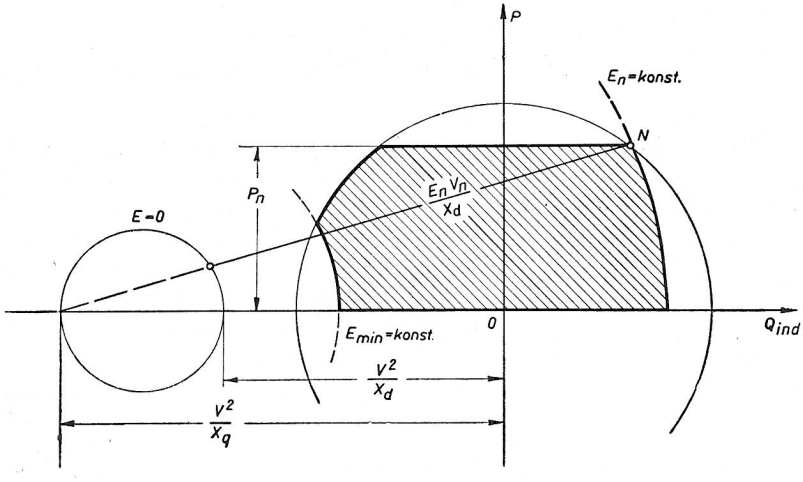
$$r = \frac{EV}{X_d} \tag{419}$$

Na sl. 203 prikazane su kružnice konstantne uzbude za turbogenerator.

Namot rotora generatora dimenzioniran je za uzbudnu struju koja odgovara nazivnom opterećenju generatora, dakle za opterećenje koje je definirano tačkom N na sl. 199. Prema tome uzbudu koja je potrebna za nazivno opterećenje možemo nazvati nazivnom uzbudom (E_n). Uz pretpostavku da se namot rotora ne može preopteretiti krivulja E_n = konst predstavlja ograničenje opterećenja radi uzbude. To ograničenje prikazano je na sl. 204 za generator s izrazitim polovima, a na sl. 205 za generator s turborotorom.

Prilikom razmatranja ograničenja radi uzbude treba uzeti u obzir ne samo maksimalnu (nazivnu) nego i minimalnu uzbudu. Ograničenje radi minimalne uzbude pojavljuje se u svakom slučaju bez obzira na izvedbu uzbudnog stroja. Potrebno je naime ne dozvoliti, da uzbuda padne ispod neke minimalne vrijednosti (obično se računa da dozvoljena minimalna uzbuda iznosi 10% od nazivne uzbude), kako bi se osigurala mogućnost djelovanja regulatora napona, što bi bilo onemogućeno kad bi uzbuda postigla vrijednost nula.

Ako se radi o uzbudnom stroju, koji je izveden kao samouzbudni stroj, ograničenje uzbude prema dolje posljedica je nemogućnosti stabilnog rada uzbudnog stroja kod malih napona [34].



Sl. ~~240~~. 204 Ograničenje opterećenja generatora s izrazitim polovima radi uzbude

Na sl. 204 i 205 prikazana je i granica rada radi minimalne uzbude. Tu su uzeta u obzir ograničenja radi ugrijavanja statora (S_n), radi pogonskog stroja (P_n i $P_{\min}$) ovo posljednje samo za turbogenerator), radi ugrijavanja rotora (nazivna uzbuda E_n) i radi minimalno dozvoljene uzbude ($E_{\min}$). Sada je mogućnost rada generatora smanjena dalje i u području induktivnih i u području kapacitivnih opterećenja, a moguće područje opterećenja prikazano je šrafiranom površinom.

Granica statičke stabilnosti definirana je relacijom

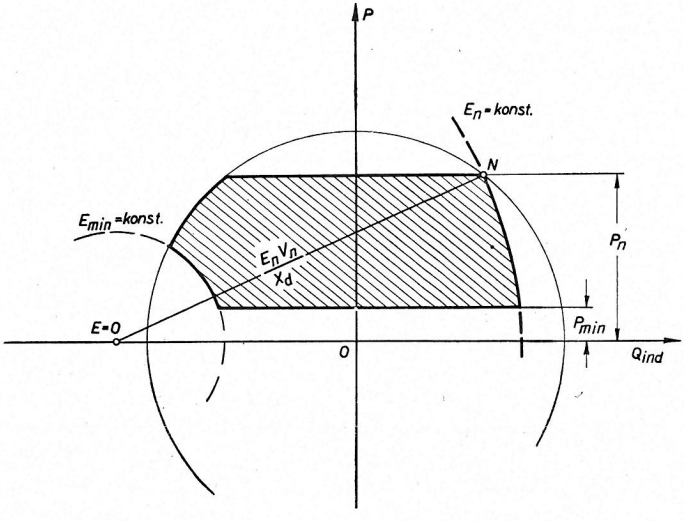
$$\frac{dP}{d\vartheta} = 0 \tag{420}$$

pa iz izraza (399) dobivamo za generator s izrazitim polovima, da je

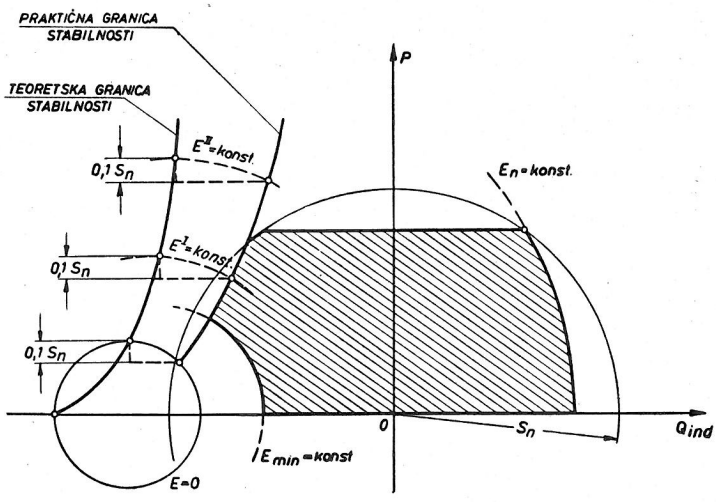
$$\cos\vartheta_s = -\frac{E}{4V}\frac{X_q}{X_d - X_q} + \sqrt{\left(\frac{E}{4V}\frac{X_q}{X_d - X_q}\right)^2 + \frac{1}{2}} \tag{421}$$

U (421) ϑ_s je kut uz koji se postiže granica stabilnosti. Za turbogenerator vrijedi, da je $\vartheta_s = 90°$ za bilo koju uzbudu.

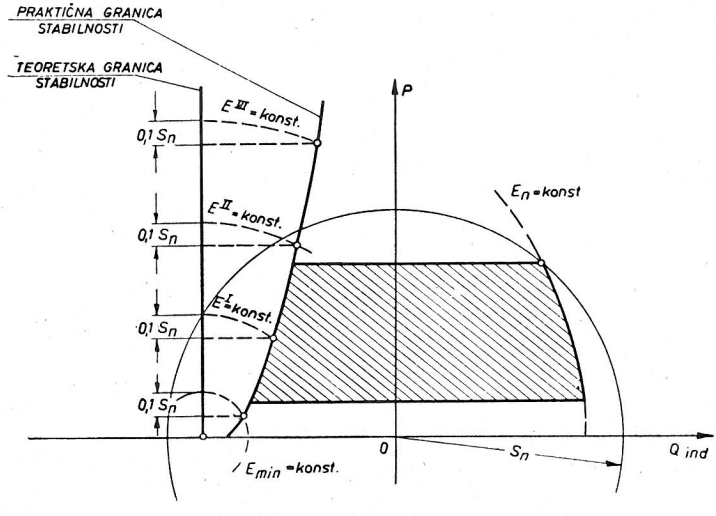
Granicu stabilnosti u koordinatnom sistemu snaga za generator s izrazitim polovima možemo konstruirati bilo da pođemo od krivulje $E =$ konst. (ako su ucrtane u dijagramu) bilo da pođemo od jednadžbe (399) i (400) za djelatnu i jalovu snagu. U prvom slučaju za određenu uzbudu odredimo kut ϑ_s iz (421), pa je sjecište pravca $\vartheta_s =$ konst. s krivuljom $E =$ konst. jedna tačka granice stabilnosti. U drugom slučaju pomoću kuta ϑ_s iz jednadžba (399) i (400) određujemo koordinate jedne tačke za odabranu uzbudu.



Sl. 205. Ograničenje opterećenja turbogeneratora radi uzbude



Sl. 206. Teoretska i praktička granica statičke stabilnosti generatora s izrazitim polovima



Sl. 207. Teoretska i praktička granica statičke stabilnosti turbogeneratora

Osim toga granicu stabilnosti možemo konstruirati i jednostavno ako spojimo tjemene vrijednosti krivulja $E =$ konst, jer za zadanu uzbudu ta tačka predstavlja maksimalnu djelatnu snagu, koju generator može proizvesti. Pri tome naravno ne uzimamo u obzir ni ograničenje radi statora ni ograničenje radi pogonskog stroja.

Tako određena granica stabilnosti predstavlja teorijsku granicu, koja se u pogonu ne može postići, jer bi svako pa i najmanje povećanje

opterećenja dovelo do ispada iz sinhronizma. Zbog toga je potrebno odrediti praktičnu granicu stabilnosti, koja se često određuje tako da se kao rezerva do teorijske granice stabilnosti ostavi 10% od nazivne prividne snage generatora. To znači ako je teorijska granica stabilnosti 50 MW, a nazivna snaga generatora 80 MVA, praktična je granica stabilnosti 50 — 0,1.80 = 42 MW. Ta praktična granica stabilnosti ostvaruje se naravno uz istu uzbudu kao i odgovarajuća teorijska granica, pa se na tome i osniva konstrukcija (sl. 206 i 207).

Prikazani način konstrukcije pogonske karte osniva se na pretpostavci da je sinhrona reaktancija konstantna i neovisna o uzbudi i o opterećenju. Ta pretpostavka međutim vrijedi samo približno, pa i pogonska karta konstruirana na opisani način daje samo približne granice opteretivosti generatora. Da dobijemo međutim tačne granice opteretivosti, najpogodnije je izvršiti snimanje na već izgrađenom generatoru, pa tako snimljena pogonska karta može poslužiti za vođenje pogona.

Vrlo je zgodno pogonsku kartu nacrtati, mjesto u apsolutnim, u relativnim veličinama. U tu svrhu postavljamo, da je $V_n = 1$ i $S_n = 1$, pa tada i reaktancije treba uvrstiti u relativnim vrijednostima. Tada je za prazni hod $E = 1$, pa se uzbuda dobiva u relativnim veličinama na bazi uzbude u praznom hodu.

Pogonska karta generatora daje dakle granice opterećenja generatora, te može poslužiti kao prva aproksimacija za određivanje granica proizvodnje jalove snage.

b) Granice jalovog opterećenja u čvorovima

Kako je već spomenuto, pri definiranju zadatka za ispitivanje na mrežnom analizatoru potrebno je za svako područje odnosno čvorište mreže odrediti maksimalnu i minimalnu potrebu jalove snage. Ta potrebna jalova snaga sastoji se od potrebne jalove snage za potrošače i od moguće proizvodnje jalove snage u elektranama u promatranom području. Označimo sa — Q_v jalovu induktivnu snagu koja je potrebna potrošačima. Znak minus upotrijebljen je, da bi se označilo da u područje treba dovesti induktivnu snagu. Naravno da pri određivanju veličine Q_v treba uzeti u obzir i gubitke i potrebnu jalovu snagu za transformatore i vodove u mreži promatranog područja, odnosno uzeti u obzir faktor snage $\cos\varphi$ u promatranom čvorištu mreže.

Ako $s + Q_{ind}$ označimo jalovu induktivnu snagu, koju mogu u promatranom momentu dati elektrane u promatranom području, a $s - Q_{cap}$ označimo jalovu kapacitivnu snagu koju mogu dati iste elektrane, granice potrebne jalove snage za područje određene su relacijama

$$Q_{\min} = -Q_v + Q_{\text{ind}} \tag{422}$$

$$Q_{\max} = -Q_v - Q_{\text{cap}} \tag{423}$$

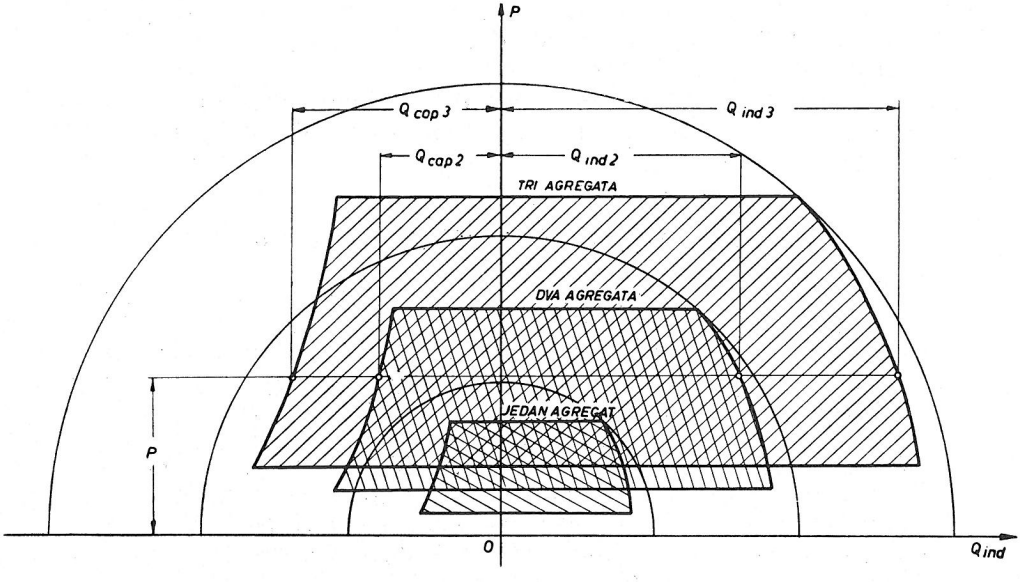
S Q_{min} označena je situacija, kad je za područje potrebna najmanja jalova induktivna snaga, a s Q_{max} ona situacija kad je potrebna najveća jalova induktivna snaga.

Da to ilustriramo, pretpostavimo da je, uz određeno djelatno opterećenje elektrane, ona sposobna da proizvede $Q_{ind} = 25$ MVAr induktivne snage i $Q_{cap} = 20$ MVAr kapacitivne snage, dok potrošači trebaju 16 MVAr induktivne snage. U tom slučaju granice potrebne jalove snage za promatrano čvorište iznose

$$Q_{min} = -16 + 25 = +9 \text{ MV Ar}$$

$$Q_{max} = -16 - 20 = -36 \text{ MV Ar}$$

To znači da će se u jednom krajnjem slučaju moći iz promatranog čvorišta dati u mrežu 9 MVAr induktivne snage, a u drugom krajnjem slučaju da bi promatrano područje iz mreže moglo preuzeti 36 MVAr induktivne snage.



Sl. 208. Primjer određivanja maksimalnog i minimalnog jalovog opterećenja elektrane s tri jednaka agregata za poznato djelatno opterećenje.

Snage Q_{ind} i Q_{cap} određuju se na osnovu pogonske karte generatora, a u ovisnosti o djelatnom opterećenju i o broju agregata, koji se predvidivo nalaze u pogonu. Na sl. 208 prikazan je slučaj elektrane s tri agregata, koja treba da proizvodi djelatnu snagu P. Za tu snagu potrebno je da budu u pogonu barem dva agregata, u kojem slučaju generatori mogu proizvesti maksimalnu induktivnu snagu Q_{ind2} i maksi-

malnu kapacitivnu snagu Q_{cap_2}. Ako je međutim potrebna veća induktivna odnosno veća kapacitivna snaga, ona se može ostvariti stavljanjem u pogon i trećeg agregata. Tada je Q_{ind_3} maksimalna induktivna, a Q_{cap_3} maksimalna kapacitivna snaga.

Sve to vrijedi za slučaj da su agregati međusobno jednaki i da je ukupno opterećenje jednoliko raspoređeno među agregate. Ako međutim u elektrani postoje generatori različitih karakteristika, potrebno je svaki od agregata razmatrati posebno.

Ako u čvorištu mreže postoji sinhroni kompenzator, potrebno je i za njega odrediti mogućnost proizvodnje jalove snage. Mogućnost proizvodnje jalove snage određena je sada maksimalnom i minimalnom uzbudom. Obično je maksimalna uzbuda tolika da je $Q_{ind} = S_n$, dok se Q_{cap} određuje — uz poznato E_{min} — na isti način kao za sinhroni generator naravno uz uvjet da je $P = 0$.

Kako je već spomenuto, pogonske karte generatora vrijede za konstantni napon, a obično ih crtamo za nazivni napon. Tek nakon provedenih mjerenja na mrežnom analizatoru moći će se odrediti pogonski napon, koji će vladati u čvorištu mreže odnosno na sabirnicama elektrana ili na priključnicama generatora. Ako su mjerenja na mrežnom analizatoru pokazala da ne treba tražiti od generatora maksimalne jalove snage (Q_{ind} odnosno Q_{cap}), nije potrebna kontrola mogućnosti te proizvodnje uz izmijenjeni napon. Ali ako je potrebna maksimalna jalova snaga, a pogonski se napon razlikuje od nazivnog napona, potrebno je pomoću korigirane pogonske karte kontrolirati, da li je ta proizvodnja moguća. Pri tome treba uzeti u obzir da se maksimalna uzbuda i nazivna struja ne mijenjaju s promjenom napona. Osim toga treba uzeti u obzir dozvoljeni opseg regulacije napona na generatoru uz održanje nazivne prividne snage generatora.

DVANAESTO POGLAVLJE

NAJPOVOLJNIJI MOMENAT STAVLJANJA U POGON HIDROELEKTRANE U OVISNOSTI O RAZVOJU KONZUMA

1. Uvodne napomene

Energetska vrijednost hidroelektrana, kako je određena u poglavlju VII, daje ujedno i redoslijed izgradnje hidroelektrana, jer je sigurno povoljnije prije izgraditi hidroelektranu koja ima veću energetsku vrijednost od hidroelektrane s manjom energetskom vrijednošću. Naravno, promatrajući hidroelektranu u elektroenergetskom sistemu, da je investicijama i troškovima hidroelektrane potrebno dodati investicije i troškove koje traži priključak promatrane hidroelektrane do čvorišta mreže, koje može preuzeti energiju i snagu promatrane hidroelektrane.

Usporedba hidroelektrana, međutim, prema njihovim energetskim vrijednostima ne može nam odgovoriti na pitanje kakvoj strukturi proizvodnje odnosno kakvom odnosu hidroelektrana i termoelektrana treba težiti u promatranom elektroenergetskom sistemu, a ne može nam ni odgovoriti na pitanje kada treba izgraditi promatrane hidroelektrane.

Da se odredi optimalna struktura proizvodnje u elektroenergetskom sistemu odnosno optimalni odnos između hidroelektrana i termoelektrana, može se postupiti na način opisan u [35]. Energetski izvori podijeljeni su u nekoliko skupina: protočne hidroelektrane, hidroelektrane s dnevnim, hidroelektrane s mjesečnim i hidroelektrane sa sezonskim akumulacijama, parne termoelektrane, termoelektrane s plinskim turbinama, nuklearne elektrane i elektrane, koje koriste plimu i oseku. Postavlja se pitanje kakav je udio pojedinih tipova elektrana najpovoljniji, pa su udjeli pojedinih tipova elektrana nepoznanice, koje treba odrediti. Poznavajući karakteristike elektrana mogu se za svaku grupu elektrana odrediti: iskoristiva snaga u kritičnom razdoblju, maksimalna snaga i godišnja proizvodnja. Potrebno je izgraditi toliko elektrana, da bude konzum zadovoljen u kritičnom razdoblju, u momentu maksimalnog opterećenja i da elektrane mogu tokom godine proizvesti barem toliko energije koliko je potrebno potrošačima. Mogu se dakle postaviti tri nejednadžbe, koje predstavljaju zadovoljenje potreba u kritičnom razdoblju i u momentu maksimalnog opterećenja, te zadovoljenje potreba s obzirom na količinu

energije. Optimalna struktura proizvodnje bit će postignuta kad ukupni troškovi budu minimalni. Treba osim toga uzeti u obzir, da udio pojedinih grupa elektrana ne može biti negativan, da su vodne snage ograničene, te da su — ako se takav zahtjev postavlja — i sredstva za investicije ograničena. Sve to se također može prikazati nejednadžbama.

Sistem nejednadžba uz uvjet da izraz koji predstavlja ukupne troškove bude minimalan, može se riješiti linearnim programiranjem [36], [37], jer se u svim slučajevima radi o linearnim izrazima.

Da bi se mogao upotrijebiti opisani način, potrebno je odrediti reprezentativne tipove pojedinih vrsta hidroelektrana i termoelektrana kako s obzirom na energetske karakteristike tako i s obzirom na investicije i troškove. To svakako dovodi do aproksimacije i do pojednostavljenja, kod čega pojedine hidroelektrane gube svoje specifične karakteristike. Radi toga prikazana metoda može odlično poslužiti kao putokaz za izgradnju, ali ne može dati odgovor na pitanje koju hidroelektranu treba graditi i kada treba da ta hidroelektrana bude u pogonu.

2. Prilike u elektroenergetskom sistemu kao funkcija konzuma

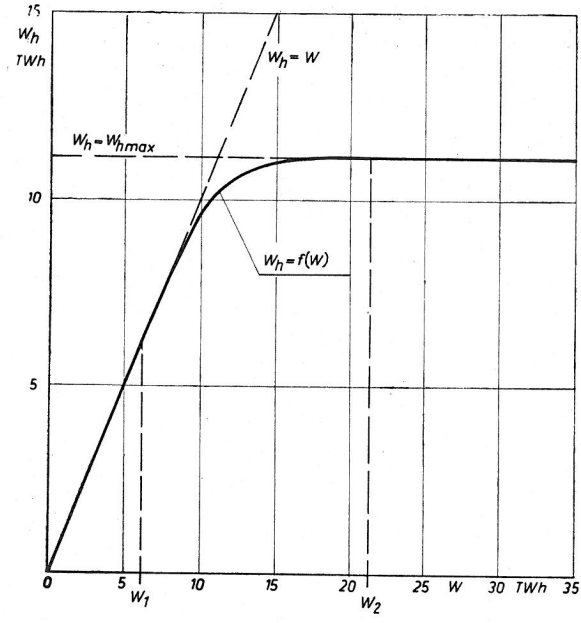
Pođimo od nekog određenog stanja izgradnje hidroelektrana — npr. od stanja izgradnje nakon dovršenja hidroelektrana, koje su u izgradnji — te promotrimo, kako se mijenjaju prilike u promatranom elektroenergetskom sistemu, ako potrošnja raste, a ne grade se nove hidroelektrane.

Ukupne troškove K za proizvodnju energije možemo prikazati izrazom

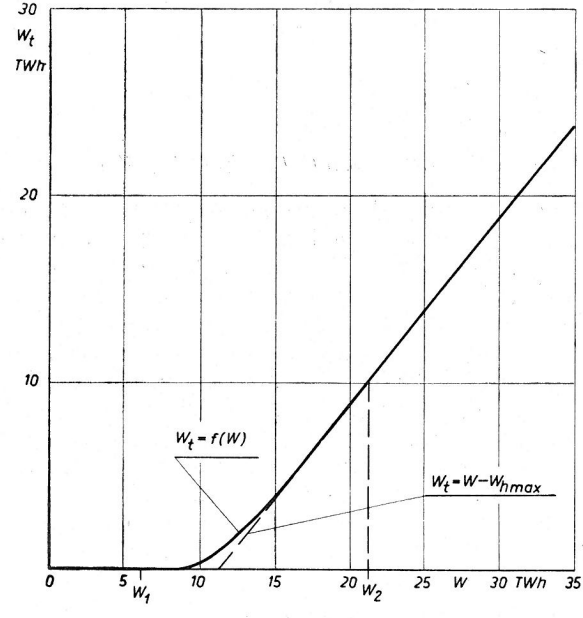
$$K = a_h I_h + a_t \varrho B_t P_t + k_b (W - W_h) \tag{424}$$

gdje su I_h investicije za hidroelektrane, a_h kvota godišnjih troškova za hidroelektrane, a_t kvota godišnjih troškova za termoelektrane, ϱ faktor rezerve, B_t specifične investicije po jedinici snage na pragu termoelektrana, P_t potrebna snaga na pragu termoelektrana za zadovoljenje potreba u kritičnom razdoblju, k_b specifični promjenljivi troškovi u termoelektranama, W ukupne potrebe energije, a W_h iskoristiva energija iz hidroelektrana. Za promatrani elektroenergetski sistem i uz pretpostavku, da se ne grade nove hidroelektrane, sve veličine u (424) su konstantne osim P_t, W i W_h. Možemo naime kao prvu aproksimaciju pretpostaviti, da su B_t i k_b neovisne o razvoju potrošnje u elektroenergetskom sistemu. Osim toga za učinjene pretpostavke i potrebna raspoloživa snaga termoelektrana P_t i iskoristiva energija iz hidroelektrana W_h ovisne su o ukupnim potrebama energije W u sistemu, pa se može postaviti, da je

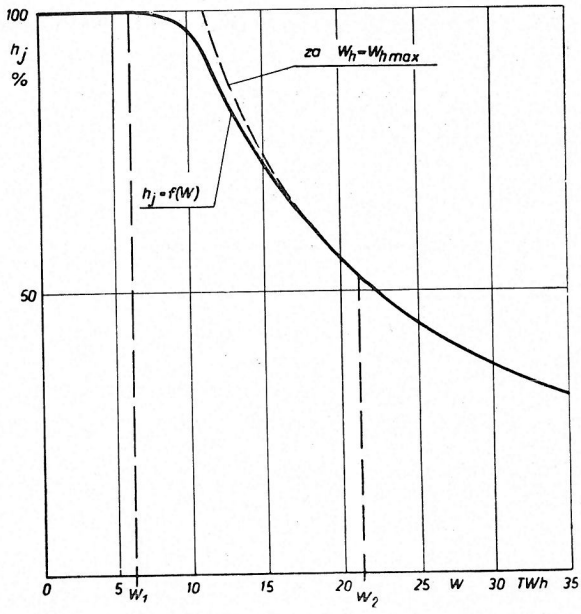
$$K = f(W) \tag{425}$$



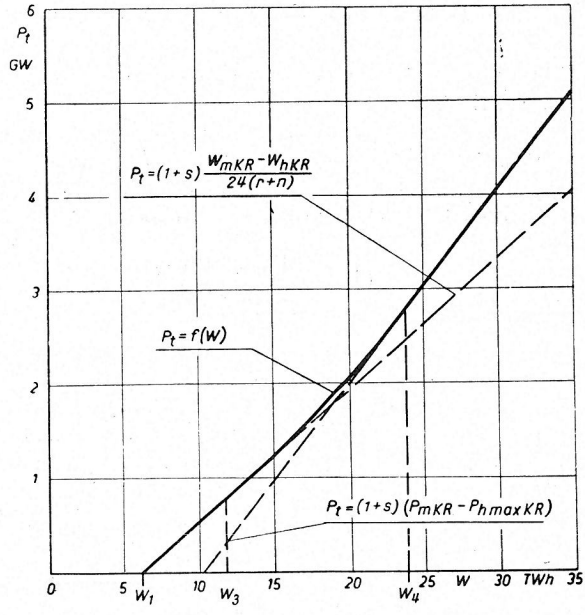
Sl. 209. Primjer ovisnosti iskoristive energije iz hidroelektrana W_h o godišnjoj potrebi energije W.



Sl. 210. Primjer ovisnosti potrebne proizvodnje iz termoelektrana W_t o godišnjoj potrebi energije W.



Sl. 211. Primjer ovisnosti udjela hidroenergije u ukupnoj proizvodnji h_j o godišnjoj potrebi energije W.



Sl. 212. Primjer ovisnosti potrebne snage termoelektrana za zadovoljenje potreba u kritičnom razdoblju P_t o godišnjoj potrebi energije W.

Proizvodne specifične troškove energije k u promatranom sistemu određujemo iz relacije

$$k = \frac{K}{W} = \frac{a_h I_h}{W} + \frac{a_t \varrho B_t P_t + k_b (W - W_h)}{W} \tag{426}$$

pa je i

$$k = f(W) \tag{427}$$

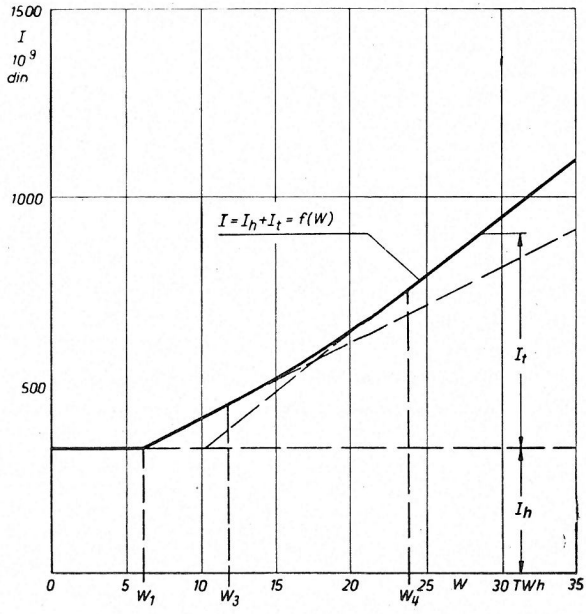
Analizirajući prilike u nizu hidroloških godina, npr. prema metodi prikazanoj u poglavlju IV, za različite godišnje potrebe energije W, mogu se — za promatrani elektroenergetski sistem — odrediti iskoristive količine energije iz hidroelektrana W_h u ovisnosti o W (sl. 209). Za male godišnje potrebe energije $O \leqq W \leqq W_1$ (sl. 209) vrijedi relacija $W_h = W$, jer se tada sve potrebe mogu zadovoljiti samo energijom iz hidroelektrana. Za veće potrebe $W_1 \leqq W \leqq W_2$ mora se tražiti dopuna iz termoelektrana (sl. 210) uz istodobne preljeve još iskoristive vode u hidroelektranama (sl. 209). Za još veće potrebe energije $W > W_2$ može se iskoristiti ukupna moguća proizvodnja hidroelektrana $W_{h\max}$, pa je tada $W_h = W_{h\max}$. Za toliki konzum $W > W_2$ potrebna proizvodnja termoelektrana W_t jednaka je razlici između konzuma i moguće proizvodnje hidroelektrana ($W_t = W - W_{h\max}$), kako je prikazano na sl. 210.

Poznavajući iskoristivu energiju hidroelektrana kao funkciju konzuma $W_h = f(W)$, lako se može odrediti i udio hidroenergije h_j u ukupnoj proizvodnji kao funkcija ukupnih godišnjih potreba (sl. 211).

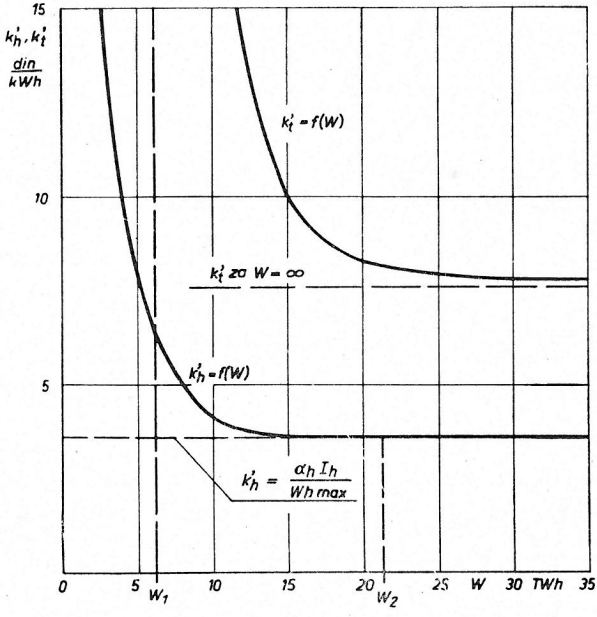
Potrebna snaga termoelektrana P_t za zadovoljenje potreba u kritičnom razdoblju također je funkcija — kako je već spomenuto — ukupnih potreba W (sl. 212). Za relativno male potrebe $0 \leqq W \leqq W_1$ nije potrebna dopuna iz termoelektrana, pa je i $P_t = 0$. Za veći konzum $W_1 \leqq W \leqq W_3$ potrebnu snagu termoelektrana za zadovoljenje potreba u kritičnom razdoblju možemo odrediti iz relacije

$$P_t = (1 + s) \frac{W_{mKR} - W_{hKR}}{24\,(r + n)} \tag{428}$$

gdje je s omjer između snage potrebne za vlastiti potrošak i snage na pragu termoelektrane, W_{mKR} mjesečna potreba energije u kritičnom razdoblju, a W_{hKR} moguća mjesečna proizvodnja hidroelektrana u kritičnom razdoblju. Relacija (428) vrijedi sve dotle dok ima toliko varijabilne energije u hidroelektranama, da se mogu zadovoljiti sve potrebe varijabilne energije. Tada naime termoelektrane rade samo u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja (poglavlje V 4). Ta je granica u primjeru na sl. 212 označena s W_3. Za veće potrebe energije $W_3 < W \leqq W_4$ termoelektrane se u kritičnom razdoblju koriste i u varijabilnom i u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja, ali ostaje neiskorišten dio snage u hidroelektranama. Međutim, za još veće godišnje potrebe energije $W > W_4$ i u kritičnom razdoblju koristi se sva



Sl. 213. Primjer ovisnosti potrebnih investicija I o godišnjoj potrebi energije W.

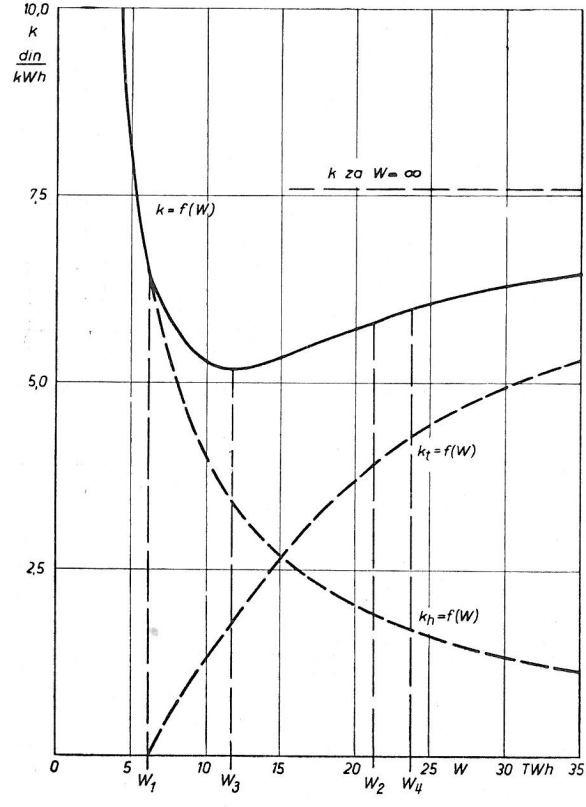


Sl. 214. Primjer ovisnosti specifičnih proizvodnih troškova u hidroelektranama k'_h (431) i termoelektranama k'_t (432) u ovisnosti o godišnjoj potrebi energije W.

snaga iz hidroelektrana, pa se potrebna snaga termoelektrana može odrediti iz relacije

$$P_t = (1 + s)\,(P_{mKR} - P_{h\,\max KR}) \tag{429}$$

gdje je $P_{m\,KR}$ maksimalno opterećenje u kritičnom razdoblju, a $P_{h\,\max KR}$ maksimalna snaga hidroelektrana u istom razdoblju.



Sl. 215. Primjer ovisnosti parcijalnih specifičnih proizvodnih troškova u hidroelektranama k_h i termoelektranama k_t, te primjer ukupnih specifičnih proizvodnih troškova k (426) o godišnjoj potrebi energije W za prilike prikazane na sl. 209—214.

Poznavajući dakle potrebnu snagu termoelektrana P_t i investicije I_h za postojeće hidroelektrane, može se odrediti ovisnost ukupnih investicija I o ukupnim potrebama iz relacije

$$I = I_h + \varrho\, B_t\, P_t \tag{430}$$

koja je za promatrani elektroenergetski sistem prikazana na sl. 213.

Interesantno je promotriti kako se mijenjaju specifični proizvodni troškovi posebno u hidroelektranama i posebno u termoelektranama. Specifični proizvodni troškovi u hidroelektranama određeni su relacijama

$$k'_h = \frac{a_h I_h}{W_h} \tag{431}$$

a u termoelektranama

$$k'_t = \frac{a_t \varrho B_t P_t}{W_t} + k_b \tag{432}$$

Ovisnost tih specifičnih proizvodnih troškova o ukupnim potrebama prikazana je na sl. 214. Specifični proizvodni troškovi u hidroelektranama k'_h opadaju s povećanjem konzuma sve dok se ne postigne konzum W_2, kod kojega se može iskoristiti sva moguća proizvodnja hidroelektrana. Specifični proizvodni troškovi u termoelektranama k'_t opadaju s povećanjem kozuma, pa oni postižu minimum za $W = \infty$, kad se konzum praktički opskrbljuje samo iz termoelektrana. Kako će se, međutim, kasnije vidjeti razmatranje specifičnih troškova k'_h i k'_b nema nikakvog značenja za prilike u elektroenergetskom sistemu, za koje su od primarnog značenja ukupni specifični proizvodni troškovi, koje određujemo iz relacije (426).

Ovisnost specifičnih proizvodnih troškova o potrebama prema relaciji (427) prikazana je na sl. 215, a za prilike prikazane na sl. 209—214. Za relativno mali konzum, sa porastom konzuma opadaju i specifični proizvodni troškovi, koji za neki konzum postižu minimum. S daljnjim porastom konzuma specifični proizvodni troškovi rastu, da bi za $W = \infty$ postigli vrijednost specifičnih proizvodnih troškova u termoelektranama. Osim ukupnih specifičnih proizvodnih troškova, na sl. 215 prikazani su i parcijalni specifični proizvodni troškovi, koji su definirani prvim odnosno drugim članom na desnoj strani izraza (426).

Krivulja $k = f(W)$ na sl. 215 pretstavlja osnovu za određivanje najpovoljnijeg momenta za izgradnju nove hidroelektrane.

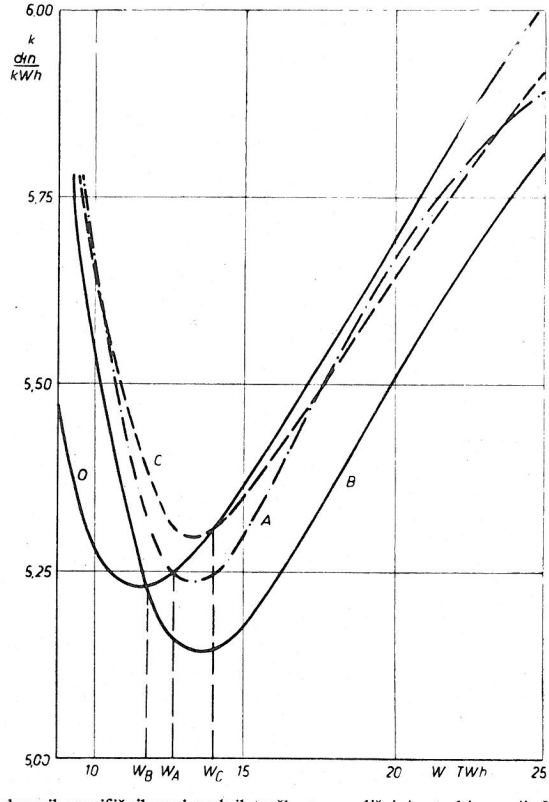
3. Određivanje najpovoljnijeg momenta za izgradnju nove hidroelektrane

Pretpostavimo, da smo — prema izloženom u poglavlju VII — utvrdili da tri hidroelektrane A, B i C od hidroelektrana, koje su razmatrane, imaju najveću energetsku vrijednost, te da prema tome kao prve dolaze u obzir za izgradnju. Postavlja se pitanje, kad je najpovoljnije da te hidroelektrane budu u pogonu, odnosno — poznavajući trajanja građenja — kad treba započeti izgradnja tih termoelektrana.

Pođimo od stanja izgradnje hidroelektrana u momentu promatranja odnosno od stanja izgradnje nakon dovršenja hidroelektrana,

čija je izgradnja već započeta. To je polazno stanje izgradnje hidroelektrana, za koje možemo — na opisan način — odrediti ovisnost specifičnih proizvodnih troškova o konzumu. Tu ovisnost za polazno stanje prikazuje krivulja *O* na sl. 216.

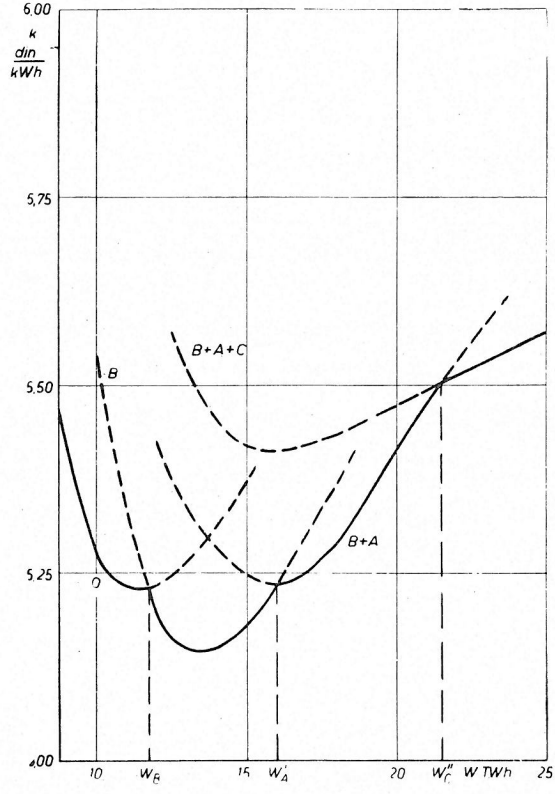
Sada pretpostavimo da je izgrađena hidroelektrana *A*. Dodavanjem moguće proizvodnje i snage hidroelektrane *A* mogućoj proizvodnji i snagama hidroelektrana za polazno stanje, doći ćemo do po-



Sl. 216. Ovisnosti ukupnih specifičnih proizvodnih troškova o godišnjoj potrebi energije *W*: prije izgradnje nove hidroelektrane (krivulja *O*) i nakon izgradnje hidroelektrane *A*, *B* i *C* (krivulje *A*, *B* i *C*).

dataka o prilikama nakon izgradnje hidroelektrane *A*. Sada je moguće odrediti ovisnost specifičnih proizvodnih troškova u ovisnosti o konzumu, ali nakon izgradnje hidroelektrane *A*. Ta ovisnost je prikazana krivuljom *A* na sl. 216. Za male potrebe krivulja *A* leži iznad krivulje *O*, a za veće potrebe — ako je promatrana hidroelektrana ekonomičnija od termoelektrana — krivulja *A* leži ispod krivulje *O*. Sjecište krivulje *O* i krivulje *A*, koje se postiže za konzum W_A (sl. 216), predstavlja momenat, kad je najpovoljnije da nova hidroelektrana bude u pogonu.

Ranije stavljanje u pogon izazvalo bi naime veće troškove od onih koji bi bili potrebni bez nove hidroelektrane A, dok bi kasnije stavljanje u pogon tražilo veće troškove od onih koji su potrebni kad bi bila izgrađena nova hidroelektrana A. Kad promatramo prilike u elektroenergetskom sistemu, a uz pretpostavku — koja je uvijek ispunjena — da potrebe energije stalno rastu, možemo zamisliti, da je na apscisu naneseno vrijeme mjesto potreba energije W. Prema tome i konzum W_A predstavlja određeni momenat u razvoju promatranog elektroenergetskog sistema.

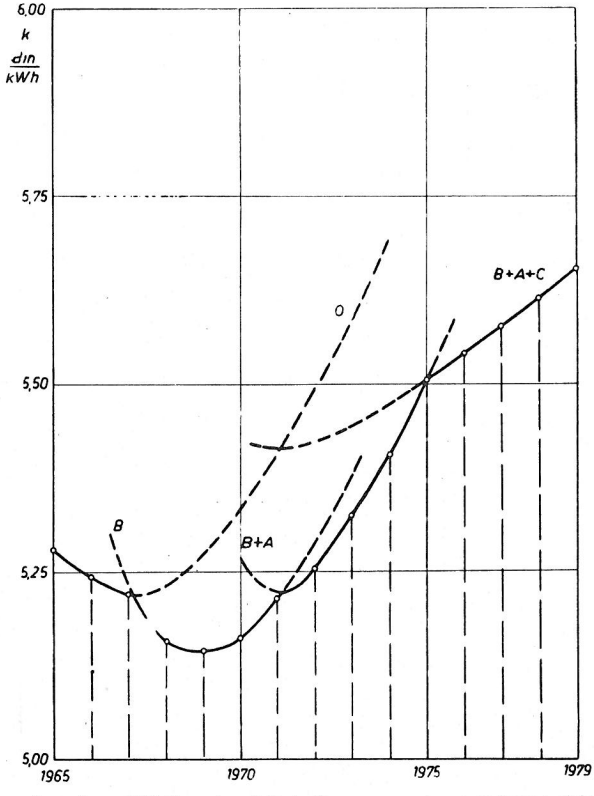


Sl. 217. Ovisnost ukupnih specifičnih proizvodnih troškova o godišnjoj potrebi energije W. Krivulja O: prije izgradnje nove hidroelektrane; krivulja B: nakon izgradnje hidroelektrane B; krivulja $B + A$: nakon izgradnje hidroelektrane B i A; krivulja $B + A + C$: nakon izgradnje hidroelektrana B, A i C.

Ako sada pored krivulje A na sl. 216 odredimo krivulje B i C, koje se dobivaju uz pretpostavku, da se kao prva nova hidroelektrana gradi hidroelektrana B odnosno hidroelektrana C, dobit ćemo dva nova sjecišta s krivuljom O. Ta dva nova sjecišta imaju apscise W_B i W_C.

Uspoređujući apscise sjecišta za primjer na sl. 216, možemo konstatirati, da je $W_B < W_A < W_C$, pa na osnovu toga možemo zaključiti, da je najpovoljnije da kao prva hidroelektrana ide u pogon hidroelektrana B, jer njena krivulja siječe krivulju O kod najmanjeg konzuma. Konzumom W_B određen je i momenat stavljanja u pogon hidroelektrane B.

Na analogan način možemo odrediti najpogodniji momenat stavljanja u pogon druge hidroelektrane. Tada ćemo poći od stanja nakon izgradnje prve hidroelektrane (u našem primjeru od stanja nakon



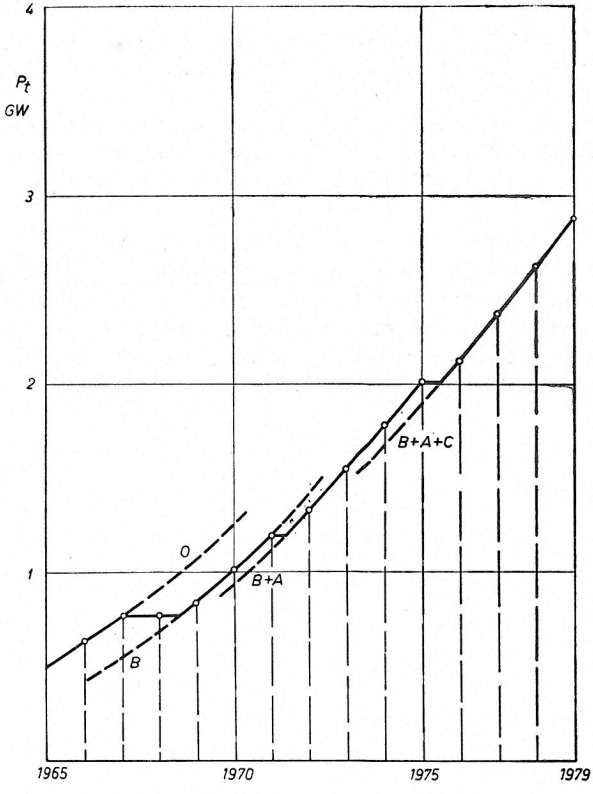
Sl. 218. Ovisnost ukupnih specifičnih proizvodnih troškova o razvoju promatranog elektroenergetskog sistema u slijedećim godinama. Krivulja O: prije izgradnje nove hidroelektrane; krivulja B: nakon izgradnje hidroelektrane B; krivulja $B + A$: nakon izgradnje hidroelektrana B i A; krivulja $B + A + C$: nakon izgradnje hidroelektrana B, A i C.

izgradnje hidroelektrane B), kao od polaznog stanja, pa postupamo na već opisani način za određivanje najpovoljnijeg momenta stavljanja u pogon prve hidroelektrane.

Na sl. 217 prikazane su pored krivulje O i krivulje B, još i krivulje $B + A$ i $B + A + C$, koje prikazuju ovisnost specifičnih troškova u

sistemu, kad se hidroelektrana A gradi kao druga, a hidroelektrana C kao treća hidroelektrana. Momenat stavljanja u pogon određen je i sada konzumom W'_A odnosno W''_C.

Da bi na apscisu nanijeli vrijeme mjesta konzuma W, potrebno je poznavati predvidivi porast potrošnje, pa na apscisu nanijeti godine mjesto konzuma. Na sl. 218 prikazane su krivulje O, B, $B + A$ i $B + A + C$ kao funkcije vremena uz pretpostavku da je $W = 10$ TWh/god u 1965. godini, te da godišnji porast konzuma iznosi 7%.



Sl. 219. Ovisnost raspoložive snage termoelektrana P_t o razvoju promatranog elektroenergetskog sistema u slijedećim godinama. Krivulja O: prije izgradnje nove hidroelektrane; krivulja B: nakon izgradnje hidroelektrane B; krivulja $B + A$: nakon izgradnje hidroelektrana B i A; krivulja $B + A + C$: nakon izgradnje hidroelektrana B, A i C

Naravno, da pravu sliku o potrebi izgradnje možemo dobiti tek onda ako promatramo konzum u godini kao cjelini, jer se kritično razdoblje ne pojavljuje u bilo kojem mjesecu, već u određenom mjesecu ili određenim mjesecima. Radi toga dijagram na sl. 218 ne treba interpretirati npr. tako da je optimalno da hidroelektrana B uđe u pogon

u prvom kvartalu 1967. godine, već na početku iste godine, ako se žele postići specifični proizvodni troškovi koji odgovaraju konzumu u 1967. godini. Prema tome imaju značenje samo one tačke na krivuljama, koje odgovaraju godini označenoj na apscisi i koje su označene kružićem na dijagramu sl. 218.

Poznavajući vrijeme stavljanja u pogon novih hidroelektrana, kao i potrebnu snagu termoelektrana za zadovoljenje konzuma u kritičnom razdoblju u ovisnosti o potrebama i u ovisnosti o izgradnji hidroelektrana, moguće je za pojedine godine odrediti potrebnu raspoloživu snagu termoelektrana na generatorima (sl. 219). I sada imaju značenje samo tačke, koje odgovaraju godinama označenim na apscisi. Treba međutim napomenuti da snaga P_t za pojedinu godinu treba biti na raspolaganju najkasnije u kritičnom razdoblju te godine. Da li je potrebno i ranije osigurati novu snagu iz termoelektrane i kolika je snaga potrebna prije kritičnog razdoblja ovisi o rasporedu dotoka u promatranom elektroenergetskom sistemu odnosno o vjerojatnosti pojave malih voda u pojedinim mjesecima koji prethode kritičnom razdoblju.

Opisani način određivanja najpovoljnijeg momenta stavljanja u pogon nove hidroelektrane osniva se na godišnjim troškovima u elektroenergetskom sistemu. Slične analize mogu se provesti s obzirom na potrebne investicije za izgradnju novih elektrana, pa se na osnovu takvih analiza može korigirati tempo izgradnje hidroelektrana, ako ne stoje na raspolaganju dovoljna sredstva za njihovu izgradnju.

Literatura

[1] ROSSANDER, C. A.: Die Anwendung der symbolischen Belastungskurven für die Elektrizitätswerke. ETZ 1913, str. 489.

[2] SOSCHINSKY, B.: Die Vorausberechnung der Selbstkosten von Elektrizitätswerken. ETZ 1918, str. 125. i 135.

[3] WOLF, M. i H. JUNGE: Belastungskurven und Dauerlinien in der elektrischen Energiewirtschaft (Enzyklopädie der Energiewirtschaft, Bd. II). Berlin—Göttingen—Heidelberg, Springer, 1959.

[4] U. C. P. T. E.: Bulletin trimestriel, IV-1960, str. 16. i II-1961, str. 18.

[5] Die österreichische Elektrizitätsversorgung im Juli 1960. ÖZE 1960, str. 648. — Die österreichische Elektrizitätsversorgung im Dezember 1960, ÖZE 1961, str. 98.

[6] Dnevna opterećenja mreže udružene elektroprivrede, Elektroprivreda 1960, str. 500. — Dnevna opterećenja udružene elektroprivrede, Elektroprivreda 1961, str. 99.

[7] STEPHENSON, H.: Ermittlung von Fehlbedarfs- und Überschussenergie, ÖZE 1950, str. 161.

[8] JERIĆ, J.: Perspektivno planiranje potrošnje i proizvodnje električne energije, Elektroprivreda 1952, str. 212.

[9] POŽAR, H.: Praktična upotreba konzumnog okvira za izradu elektroenergetskih bilanca, Elektroprivreda 1952, str. 216.

[10] Die Stromerzeugung in den Wärmekraftwerken der U.C.P.T.E.-Länder im Jahre 1959. mit Rückblick auf die Jahre 1955.—1959. U.C.P.T.E.-Jahresbericht 1959.—1960.

[11] WASSEIGER, H.: Projet de normalisation des définitions des termes en exploitation des centrales hydroélectriques. Congrès UNIPEDE 1952, Ref. III/9.

[12] ROGGENDORF, A.: Der Eigenbedarf mittlerer und grosser Kraftwerke, Berlin—Göttingen—Heidelberg, Springer, 1952.

[13] Electricité de France: Essai de détermination d'un critérium de valeur des équipements. Direction de l'équipement, Paris, 1953.

[14] MUSIL, L.: Die Gesamtplanung von Dampfkraftwerken, 2. izdanje, Berlin—Göttingen—Heidelberg, Springer, 1948.

[15] PILGRAM, W.: Der Einsatz von Dampfturbosätzen grosser Leistung zur Spitzendeckung und Frequenzhaltung in Verbundnetzen. Siemens-Z. 1957, str. 435.

[16] SCHURING, W.: Nachtlastbetrieb in Wärmekraftwerken. Brennstoff—Wärme —Kraft, 1954 str. 301.

[17] RICARD, J.: Equipement thermique des usines génératrices d'énergie électrique. Paris, Dunod, 1948.

[18] NAGEL, H. i R. EHRLICH: Neuere Erfahrungen beim täglichen Schnellstart von Dampfturbinen. Elektrizitätswirtschaft 1961, str. 191.

[19] HAAS, H. i W. TRASSL: Das Anfahren von Dampfturbinen, Siemens-Z. 1958, str. 665. i 735.

[20] HÄRRY, X.: Die Ökonomie der Wasserkraftnutzung. Winterthur, P. G. Kelle, 1957.

[21] STEINBERG, M. J. i T. H. SMITH: Economy Loading of Power Plants and Electric Systems. New York, Wiley and Sons, 1943.

[22] BOLOTOV, V. V.: Teoretičeskie osnovi viboru ekonomičnego režimi složnoj elektroenergetičeskoj sistemi, Moskva—Leningrad, 1947.

[23] POŽAR, H.: Ekonomična raspodjela opterećenja u elektroenergetskom sistemu. Zagreb, Školska knjiga, 1953.
[24] SCHURING, W.: Wärmewirtschafliche Nachkalkulation und Lastverteilung, Brennstoff—Wärme—Kraft 1953, str. 1.
[25] GIBRAT, R.: Aménagement hydroélectrique des cours d'eau. Statistique mathématique et calcul de probabilité, Rev. Gén. Elect. 1932, str. 493. i 525.
[26] TONINI, M.: Elementi per l'elaborazione statistica dei dati caratteristici dei corsi d'aqua con particolare referimenti agli avvenimenti rari. Energia elettrica 1939, str. 283. i 348.
[27] JERIĆ, J.: Primjena statističko-matematskih metoda u elektroprivredi. Elektroprivreda 1958, str. 394.
[28] MOROZOV, A. A.: Ispolzovanie vodnii energii. Moskva-Leningrad, 1948.
[29] LUDIN, A.: Wasserkraftanlagen, I dio. Berlin, Springer, 1934.
[30] MOSTKOV, M. A.: Osnovi teorii gidroenergetičeskogo proektovania. Moskva —Leningrad, 1948.
[31] Electricité de France: Eléments pour l'établissement des avant-projets d'amenagements hydroélectriques.
[32] WOLF, M.: Arbeitsverlustfaktor, Verluststunden und verwandte Begriffe, Elektrizitätswirtschaft 1958, str. 325, 708. i 741.
[33] KIMBARK, E. W.: Power System Stability, III dio. New York, Wiley and Sons, 1956.
[34] BUCHHOLD, Th. i H. HAPPOLDT: Elektrische Kraftwerke und Netze, 3. izdanje, Berlin—Göttingen—Heidelberg, Springer, 1956.
[35] MASSÉ, P.: Le choix des investissements. Paris, Dunod, 1959.
[36] CHARNES A., W. W. COOPER i A. HENDERSON: An Introduction to Linear Programming. New York, Wiley and Sons, 1953.
[37] METZGER, R. W.: Elementary Mathematical Programming. New York, Wiley and Sons, 1958.

Oznake upotrebljene u formulama

A

A	konstanta ovisna o terenskim prilikama i tipu hidroelektrane u približnoj formuli za određivanje investicija hidroelektrane
A_g	geometrijski volumen akumulacije
A_k	korisni volumen akumulacije
ΔA_{max}	maksimalno mjesečno pražnjenje akumulacije

B

B	dodatne specifične investicije za hidroelektranu po kW
B_1	dodatne specifične investicije za hidroelektranu po m³/sek
B_{1h}	dio dodatnih specifičnih investicija za hidroelektranu po m³/sek, koji ovisi o padu
B_{1l}	dio dodatnih specifičnih investicija za hidroelektranu po m³/sek, koji ovisi o duljini dovoda
B_h	dio dodatnih specifičnih investicija za hidroelektranu po kW, koji ovisi o padu
B_{hr}	dio relativnih specifičnih investicija za hidroelektranu po kW, koji ovisi o padu
B_l	dio dodatnih specifičnih investicija za hidroelektranu po kW, koji ovisi o duljini dovoda
B_{lr}	dio relativnih specifičnih investicija za hidroelektranu po kW, koji ovisi o duljini dovoda
B_r	relativne specifične investicije za hidroelektranu po kW
B_t	specifične investicije za termoelektranu po kW

C

C	kapacitet voda
C_1	kapacitet po km voda

D

D	dovedena snaga

E

E	uzbuda generatora
E_h	energetska vrijednoost hidroelektrane s obzirom na troškove
E_{hi}	energetska vrijednost hidroelektrane s obzirom na investicije
E_{hn}	energetska vrijednost hidroelektrane preračunata na prvu godinu
E_{hsn}	energetska vrijednost hidroelektrane s obzirom na sumu investicija i pogonskih troškova
E_{min}	minimalna uzbuda generatora
E_v	vrijednost gubitaka

F

F	konstanta za određivanje gubitaka prijenosa

H

H	neto-pad u hidroelektrani
H'	neto-pad kod maksimalnog opterećenja
H''	neto-pad kod srednjeg opterećenja
H_1	pad uzvodne hidroelektrane
H_2	pad nizvodne hidroelektrane
H_m	srednji energetski pad

I

I	investicije u energetskom sistemu
I	struja (XI poglavlje)
I_d	uzdužna komponenta struje
I_h	investicije hidroelektrane

I'_h investicije hidroelektrane bez dovoda
I''_h investicije dovoda hidroelektrane
I_{ho} investicije postojećih hidroelektrana
I_n nazivna struja
I_q poprečna komponenta struje

K

K ukupni troškovi u sistemu
K_a godišnja korist zbog smanjenja redukcija
K_b promjenljivi troškovi u termoelektranama prije izgradnje novih termoelektrana
K_{br} promjenljivi troškovi u termoelektranama nakon izgradnje novih termoelektrana
K_h troškovi u hidroelektrani
K_{ho} troškovi u postojećim hidroelektranama
K_n korist u narodnoj privredi zbog smanjenja redukcija
K_t ukupni troškovi u termoelektranama
K'_t stalni troškovi u termoelektranama
K''_t promjenljivi troškovi u termoelektranama
K_s povećanje troškova u sistemu zbog smanjenja redukcije
K_v stalni godišnji troškovi dalekovoda
K_{v1} stalni godišnji troškovi po km dalekovoda

L

L duljina dovoda hidroelektrane (IX poglavlje)
L induktivitet (X poglavlje)

P

P djelatna snaga
P_h djelatna snaga hidroelektrane uz prirodni dotok
$P_{h1\,max}$ maksimalna snaga uzvodne hidroelektrane
$P'_{h1\,max}$ maksimalna snaga uzvodne hidroelektrane preračunata na pad nizvodne hidroelektrane
$P_{h2\,max}$ maksimalna snaga nizvodne hidroelektrane
$P_{ha\,max}$ maksimalna snaga akumulacione hidroelektrane
P_{hk} konstantna snaga hidroelektrane
$P_{h\,KR}$ iskoristiva snaga hidroelektrane u kritičnom razdoblju
$P_{h\,max}$ maksimalna snaga hidroelektrane
$P_{hmax\,KR}$ maksimalna snaga hidroelektrane u kritičnom razdoblju
P_{hq} raspoloživa snaga protočne hidroelektrane
P_{hv} varijabilna snaga hidroelektrane
P_i instalirana snaga hidroelektrane
P_{io} instalirana snaga hidroelektrane s najnižim specifičnim investicijama po kWh
$P_{i\,opt}$ optimalna instalirana snaga hidroelektrane
P_{it} instalirana snaga termoelektrane
P_k konstantno opterećenje
P'_{k1} konstantna snaga uzvodne hidroelektrane preračunata na pad nizvodne hidroelektrane
P_{k2} konstantna snaga nizvodne hidroelektrane
P_m maksimalno opterećenje voda
P_{max} maksimalno opterećenje
P_{min} minimalno opterećenje
P_{mk} mjesečno konstantno opterećenje
P_{mk} maksimalno opterećenje voda u kritičnom razdoblju (X poglavlje)
$P_{m\,KR}$ maksimalno opterećenje u kritičnom razdoblju
P_{ms} maksimalno opterećenje voda kojim je zamijenjena mreža
P'_{ms} zbroj maksimalnih opterećenja vodova, koji su priključeni na vod kojim je zamijenjena mreža
P_{mv} mjesečno varijabilno opterećenje
P_n nazivna djelatna snaga
P_{nv} varijabilno opterećenje n-tog potrošača
P_r smanjenje reducirane snage
P_t raspoloživa snaga termoelektrana
P_{tk} potrebna snaga termoelektrana u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja
$P_{t\,KR}$ potrebna snaga termoelektrana u kritičnom razdoblju
$P_{t\,max}$ maksimalna potrebna snaga termoelektrana
$P_{t\,min}$ minimalna snaga (tehnički minimum) termoelektrane

P_{to} raspoloživa snaga termoelektrana prije izgradnje novih termoelektrana (VI poglavlje)

P_{to} potrebna snaga termoelektrana prije izgradnje nove hidroelektrane (VII poglavlje)

P_{tv} potrebna snaga termoelektrana u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja

P_v varijabilna snaga

ΔP razlika između maksimalne snage hidroelektrana i maksimalnog opterećenja

ΔP_{h2} srednja snaga međudotoka između uzvodne i nizvodne hidroelektrane

ΔP_{hk} prebačena konstantna snaga hidroelektrana

ΔP_{hv} prebačena varijabilna snaga hidroelektrana

ΔP_k razlika između konstantne snage hidroelektrana i konstantnog opterećenja

ΔP_m maksimalni gubitak snage u vodu

ΔP_{mk} maksimalni gubitak snage u vodu u kritičnom razdoblju

ΔP_{ms} maksimalni gubitak snage u vodu kojim je zamijenjena mreža

ΔP_o gubici praznog hoda i korone

ΔP_t potrebna dodatna snaga u termoelektranama zbog gubitaka u vodu

ΔP_{tv} potrebno povećanje snage termoelektrana

ΔP_v razlika između varijabilne snage hidroelektrana i varijabilnog opterećenja

δP_h neiskorištena snaga hidroelektrana

δP_{hk} neiskorištena konstantna snaga hidroelektrana

δP_{hv} neiskorištena varijabilna snaga hidroelektrana

Q

Q jalova snaga (XI poglavlje)

Q protok u m^3/sek

Q_1 konstantni dotok (m^3/sek) u akumulacioni bazen uzvodne hidroelektrane

Q_2 konstantni dotok (m^3/sek) u akumulacioni bazen nizvodne hidroelektrane

Q_i veličina izgradnje hidroelektrane

Q_{i1} veličina izgradnje uzvodne hidroelektrane

Q_{i2} veličina izgradnje nizvodne hidroelektrane

Q_{cap} kapacitivna jalova snaga

Q_{ind} induktivna jalova snaga

Q_m jalovo opterećenje na kraju voda

Q_{max} maksimalno potrebno induktivno jalovo opterećenje

Q_{min} minimalno potrebno induktivno jalovo opterećenje

Q_v potrebna jalova snaga za potrošače

R

R djelatni otpor

S

S_n nazivna prividna snaga

T

T trajanje pogona termoelektrane

T_v trajanje korištenja varijabilne snage

T'_v trajanje korištenja snaga P_{mv}

T'_{vh} trajanje korištenja kojim je označena granica pojave pogreške kod određivanja potrebne snage termoelektrana

U

U_2 linijski napon na kraju voda

V

V fazni napon

V_1 količina vode koja dotječe u akumulacioni bazen uzvodne hidroelektrane

V_2 količina vode koja dotječe u akumulacioni bazen nizvodne hidroelektrane

V_i iskoristiva količina vode

V_n nazivni fazni napon

W

W energija

W_a energetska vrijednost akumulacije

W_{ak} korisna energetska vrijednost akumulacije

W_{ao} energetska vrijednost akumulacije koju osigurava godišnje korištenje akumulacionog bazena

W_{az} energetska vrijednost drugog dijela akumulacionog bazena

W_D potrošnja topline

W_d potrebna energija u radnom danu

W_{dn} potrebna energija u neradnom danu

W_h moguća proizvodnja hidroelektrane

W_{h1m} moguća proizvodnja uzvodne hidroelektrane

W'_{h1m} moguća proizvodnja uzvodne hidroelektrane preračunata na pad nizvodne hidroelektrane

W_{h2m} moguća proizvodnja nizvodne hidroelektrane

W_{ha} moguća proizvodnja akumulacione hidroelektrane

W_{hk} proizvodnja konstantne energije

W_{hkd} proizvodnja konstantne energije u radnom danu

$W_{h\,KR}$ proizvodnja hidroelektrane u kritičnom razdoblju

$W_{h\,KRk}$ proizvodnja konstantne energije u hidroelektrani u kritičnom razdoblju

$W_{h\,KRv}$ proizvodnja varijabilne energije u hidroelektrani u kritičnom razdoblju

W_{hm} mjesečna moguća proizvodnja hidroelektrane

$W_{h\,\max}$ maksimalna moguća proizvodnja hidroelektrane

W_{ho} moguća proizvodnja postojećih hidroelektrana

W_{hq} moguća proizvodnja protočne hidroelektrane

W_{hv} proizvodnja varijabilne energije

W_{hvd} proizvodnja varijabilne energije u radnom danu

W_k potrebna dnevna konstantna energija

W_m potrebna mjesečna energija

$\overline{W}_m$ prosječna potrebna mjesečna energija

W_{mo} mjesečna potrebna energija u početku godine

W'_{mo} mjesečna potrebna energija u početku godine uz pretpostavku eksponencijalnog porasta potreba

W_{m1} mjesečna potrebna energija na kraju godine

W'_{m1} mjesečna potrebna energija na kraju godine uz pretpostavku eksponencijalnog porasta potreba

W_{mk} mjesečna potrebna konstantna energija

$W_{m\,KR}$ potrebna energija u kritičnom razdoblju

W_{ms} srednja mjesečna proizvodnja hidroelektrane

W_{mv} mjesečna potrebna varijabilna energija

W_n potrebna energija u razdoblju malih opterećenja

W_r godišnja dodatno proizvedena energija

W_t proizvodnja termoelektrana

W_{tk} proizvodnja termoelektrana u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja

W_{tv} proizvodnja termoelektrana u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja

W_v potrebna varijabilna energija u radnom danu

ΔW razlika između moguće proizvodnje hidroelektrana i potreba energije

ΔW gubici energije u vodu (X poglavlje)

ΔW_{hk} prebačena konstantna energija hidroelektrana

ΔW_{hv} prebačena varijabilna energija hidroelektrana

ΔW_k razlika između proizvodnje konstantne energije u hidroelektranama i potrebne konstantne energije

ΔW_k gubici energije u vodu u kritičnom razdoblju (X poglavlje)

$\Delta W'_k$ dio gubitaka energije u vodu za vrijeme rt_{hk}

$\Delta W''_k$ dio gubitaka energije u vodu izvan vremena rt_{hk}

ΔW_{mo} razlika mjesečnih potreba u početku godine uz pretpostavku eksponencijalnog i linearnog porasta

$\Delta W'_{mo}$ razlika između mjesečnih potreba i pomičnog prosjeka

ΔW_{m1} razlika mjesečnih potreba na kraju godine uz pretpostavku eksponencijalnog i linearnog porasta

ΔW_s gubici energije u vodu kojim je zamijenjena mreža

ΔW_t potrebno povećanje proizvodnje u termoelektranama zbog gubitaka u vodu

ΔW_{tv} potrebno povećanje proizvodnje u termoelektranama

ΔW_v razlika između proizvodnje varijabilne energije u hidroelektranama i potrebne varijabilne energije

δW_h neiskorištena energija hidroelektrana

δW_{hk} neiskorištena konstantna energija hidroelektrana

δW_{hv} neiskorištena varijabilna energija hidroelektrana

X

X_d uzdužna reaktancija generatora

X_q poprečna reaktancija generatora

a

a relativna energetska vrijednost akumulacije

a konstanta ovisna o terenskim prilikama i tipu hidroelektrane u približnoj formuli za određivanje troškova u hidroelektrani (IX poglavlje)

a_1 relativna energetska vrijednost uzvodne akumulacije

a_1 omjer između povećanog i osnovnog proizvodnog kapaciteta potrošača (VI poglavlje)

a'_1 relativna energetska vrijednost uzvodne akumulacije preračunata na pad nizvodne akumulacije

$a'_{1\,max}$ maksimalno potrebna relativna energetska vrijednost uzvodne akumulacije preračunata na pad nizvodne hidroelektrane

a_2 relativna energetska vrijednost nizvodne akumulacije

$a_{2\,max}$ maksimalno potrebna relativna energetska vrijednost nizvodne hidroelektrane

$a_{2\,max\,c}$ maksimalno potrebna relativna energetska vrijednost nizvodne akumulacije kad w_{2m} ima vrijednost prema (70)

$a_{2\,max\,d}$ maksimalno potrebna relativna energetska vrijednost nizvodne akumulacije kad je $w_{2m} = 1$

a_k iskoristiva relativna energetska vrijednost akumulacije

$a_{k\,max}$ maksimalno potrebna relativna vrijednost kompenzacionog bazena

a_{max} najveća potrebna relativna energetska vrijednost akumulacije

a_s specifična proizvodnja industrije po jedinici utrošene energije

a_v omjer definiran formulom (183)

b

b omjer definiran formulom (184)

b dodatni specifični godišnji troškovi u hidroelektrani po kW (IX poglavlje)

b_t stalni specifični godišnji troškovi u termoelektranama po kW

c

c specifična vrijednost industrijske proizvodnje

c_w cijena topline u gorivu

e

e omjer varijabilne i ukupne energije hidroelektrana u mjesecu minimalne proizvodnje (IV poglavlje)

e relativna energetska vrijednost hidroelektrane s obzirom na troškove (VII poglavlje)

e_i relativna energetska vrijednost hidroelektrane s obzirom na investicije

e_n relativna energetska vrijednost hidroelektrane preračunata na prvu godinu

e_{sn} relativna energetska vrijednost hidroelektrane s obzirom na sumu investicija i pogonskih troškova

g

g omjer P_{ms} i P'_{ms}

h

h_j udio hidroenergije u ukupnim potrebama energije

h_{KR} udio hidroenergije u potrebama energije u kritičnom razdoblju

h_v udio raspoložive varijabilne energije hidroelektrana u potrebama varijabilne energije

$h_{v\,min}$ udio minimalno raspoložive varijabilne energije hidroelektrana u potrebama varijabilne energije

i

i'' specifične investicije po km dovoda hidroelektrane

i_p specifične investicije hidroelektrane po kW

i_w specifične investicije hidroelektrane po kWh

k

k konstanta za određivanje snage hidroelektrane

k omjer potrebne dodatne snage termoelektrane i maksimalnih gubitaka snage u vodu (X poglavlje)

k specifični proizvodni troškovi u sistemu (XII poglavlje)

k_b specifični promjenljivi troškovi u termoelektrani po kWh

$k_{b\,min}$ najmanji specifični promjenljivi troškovi u jednoj od termoelektrana sistema

k_{bs} promjenljivi specifični troškovi po kWh u termoelektranama prije izgradnje nove hidroelektrane

k'_{bs} promjenljivi specifični troškovi po kWh u termoelektranama nakon izgradnje nove hidroelektrane

k_C veličina za određivanje nadoknadnog kapaciteta vrlo dugog voda

k_m troškovi u industriji preračunati na jedinicu proizvoda

k_p dodatna korist zbog smanjenja redukcije

k_R veličina za određivanje nadoknadnog djelatnog otpora vrlo dugog voda

k_r promjenljivi specifični troškovi u termoelektranama preračunati na povećanu proizvodnju

k_w specifična korist zbog dodatno isporučene energije

k_z dodatna specifična korist zbog dodatno isporučene energije

l

l duljina voda

l_s duljina voda kojim je zamijenjena mreža

m

m faktor opterećenja

m_m mjesečni faktor opterećenja

m_{nv} faktor opterećenja varijabilne energije n-tog potrošača

m_o omjer minimalnog i maksimalnog opterećenja

m'_o omjer konstantnog i maksimalnog opterećenja

m'_{om} omjer mjesečnog konstantnog i maksimalnog opterećenja

$m_{t\,KR}$ faktor opterećenja termoelektrana u kritičnom razdoblju

n

n broj neradnih dana

p

p kamatna stopa

p_k relativna pogreška pri određivanju mjesečnog konstantnog opterećenja

p_v raspoloživa relativna varijabilna snaga hidroelektrane

Δp relativni gubici snage u vodu

Δp_{tv} relativna pogreška pri određivanju potrebne snage termoelektrana u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja

q

q omjer veličina izgradnje uzvodne i nizvodne hidroelektrane

q presjek vodiča (X poglavlje)

q_s presjek vodiča voda kojim je zamijenjena mreža

r

r broj radnih dana

s

s omjer snage za vlastiti potrošak i snage na pragu elektrane

s dodatna proizvodnja pare (II poglavlje)

s'_d prosječna ukupna potrošnja topline

t

t_h trajanje korištenja konstantne snage hidroelektrane u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja (VII poglavlje)

t_h trajanje korištenja protoka u hidroelektrani za vrijeme vlažnog razdoblja (IX poglavlje)

t_{hk} trajanje konstantnog opterećenja termoelektrana u varijabilnom području dijagrama opterećenja

t_{KR} trajanje korištenja varijabilne snage hidroelektrane u kritičnom razdoblju (VII poglavlje)

t_{KR} apscisa na krivulji trajanja snage kojom je definirana snaga u kritičnom razdoblju (IX poglavlje)

t_m trajanje malih opterećenja

t_{nv} trajanje korištenja varijabilnog opterećenja n-tog potrošača

t_{opt} apscisa na krivulji trajanja kojom je definirana optimalna instalirana snaga hidroelektrane

t_t trajanje opterećenja termoelektrana kojim je određena potrebna dodatna proizvodnja termoelektrana za pokriće gubitaka u vodu

$t_{tv\,\max}$ maksimalno trajanje korištenja potrebne snage termoelektrana u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja

$t_{tv\,\min}$ minimalno trajanje korištenja potrebne snage termoelektrana u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja

t_v trajanje velikih opterećenja

t_{v1} trajanje korištenja varijabilne snage uzvodne hidroelektrane bez proizvodnje konstantne energije

t'_{v1} trajanje korištenja varijabilne snage uzvodne hidroelektrane uz istodobnu proizvodnju konstantne energije

t'_{v1c} trajanje korištenja varijabilne snage uzvodne hidroelektrane kad w_{2m} ima vrijednost prema (70)

t'_{v1d} trajanje korištenja varijabilne snage uzvodne hidroelektrane kad je $w_{2m} = 1$

t_{v2} trajanje korištenja varijabilne snage nizvodne hidroelektrane bez proizvodnje konstantne energije

t'_{v2} trajanje korištenja varijabilne snage nizvodne hidroelektrane uz istodobnu proizvodnju konstantne energije

t_{vh} maksimalno trajanje korištenja varijabilne snage hidroelektrane

t'_{vh} trajanje korištenja varijabilne snage hidroelektrane

Δt vrijeme potrebno da vodni val iz uzvodne stigne do nizvodne hidroelektrane

v

v vjerojatnost

v omjer između dotoka u uzvodnu i dotoka u nizvodnu hidroelektranu (II poglavlje)

v_B relativna pojava slučajeva grupe B (tab. 28)

v_C relativna pojava slučajeva grupe C (tab. 28)

v_D relativna pojava slučajeva grupe D (tab. 28)

w

w ukupna oscilacija potrošnje

w' relativni gubici u vodu za vrijeme rt_{hk}

w'' relativni gubici u vodu za vrijeme rt_t

w_{1m} relativna proizvodnja uzvodne hidroelektrane

w_{2m} relativna proizvodnja nizvodne hidroelektrane

w_g relativna proizvodnja hidroelektrane u razdoblju velikih opterećenja

w_k relativna proizvodnja konstantne energije hidroelektrane

w_{kl} relativna proizvodnja hidroelektrane u razdoblju malih opterećenja

w_m relativna moguća mjesečna proizvodnja hidroelektrane

w'_m relativna moguća mjesečna proizvodnja hidroelektrane za koju je potreban maksimalni volumen akumulacije

w''_m relativna moguća mjesečna proizvodnja hidroelektrane za koju još vrijedi izraz (75) za

određivanje količine varijabilne energije

w'''_m relativna moguća mjesečna proizvodnja hidroelektrane za koju još vrijedi izraz (89) za određivanje količine varijabilne energije

w_n omjer potreba energije u neradnom danu i potreba u radnom danu

w'_p relativna mjesečna potrošnja

w_{po} relativna mjesečna potrošnja u početku godine uz pretpostavku porasta po pravcu

w'_{po} relativna mjesečna potrošnja u početku godine

w_{pon} relativna mjesečna potrošnja u početku n-te godine

w_{p1} relativna mjesečna potrošnja na kraju godine uz pretpostavku porasta po pravcu

w'_{p1} relativna mjesečna potrošnja na kraju godine

w_{p1n} relativna mjesečna potrošnja na kraju n-te godine

w_s približna relativna sezonska oscilacija potrošnje

w'_s relativna sezonska oscilacija potrošnje

w_t smanjenje proizvodnje u termoelektranama

w_v relativna proizvodnja varijabilne energije u hidroelektrani

w_v omjer potrebne varijabilne energije i ukupnih potreba (I poglavlje)

w_v moguća proizvodnja varijabilne energije u promatranoj hidroelektrani (VII poglavlje)

Δw relativni gubici energije

Δw_p relativne oscilacije potrošnje zbog porasta

Δw_s relativne oscilacije potrošnje zbog sezonskih oscilacija potrošnje

α

α jedna od veličina kojom je određena aproksimacija krivulje trajanja opterećenja pomoću tri pravca

α omjer između povećanja proizvodnje u termoelektranama i godišnjih gubitaka energije (X poglavlje)

α_o odsječak na apscisi (sl. 6)

α_o omjer između povećanja proizvodnje u termoelektranama i godišnjih gubitaka energije radi gubitaka praznog hoda i korone (X poglavlje)

α_h kvota godišnjih troškova u hidroelektrani

α'_h kvota pogonskih troškova u hidroelektrani

α_m omjer mjesečnog povećanja proizvodnje u termoelektranama i mjesečnih gubitaka

α_t kvota godišnjih troškova u termoelektranama

α'_t kvota pogonskih troškova u termoelektranama

β

β jedna od veličina kojom je određena aproksimacija krivulje trajanja opterećenja pomoću tri pravca

β omjer maksimalnog opterećenja u kritičnom razdoblju i maksimalnog godišnjeg opterećenja voda (X poglavlje)

β_o odsječak na ordinati (sl. 6)

β_s omjer maksimalnog opterećenja u kritičnom razdoblju i maksimalnog godišnjeg opterećenja voda kojim je zamijenjena mreža

β_t relativni stalni specifični troškovi u termoelektrani po jedinici snage

γ

γ konstanta koja karakterizira utjecaj mreže na optimalni presjek voda

δ

δ faktor gubitaka

δ_k faktor gubitaka u kritičnom razdoblju

ε

ε omjer potreba varijabilne i ukupne energije

ε_k omjer varijabilne energije hidroelektrana i ukupnih potreba u kritičnom razdoblju

ε_{KR} omjer varijabilne energije i ukupne proizvodnje hidroelektrana u kritičnom razdoblju

η

η stupanj djelovanja agregata

η_c iskorištenje kapaciteta potrošača

$\bar{\eta}_c$ prosječno iskorištenje kapaciteta potrošača

η_{tr} stupanj djelovanja transformatora

ϑ

ϑ kut između vektora napona i uzbude

ϑ_s kut između vektora napona i uzbude na granici statičke stabilnosti

$\varkappa$

$\varkappa_p$ relativna dodatna korist zbog smanjenja redukcije

$\varkappa_r$ relativni promjenljivi specifični troškovi u termoelektranama određeni za povećanu proizvodnju u termoelektranama (zbog smanjenja redukcija)

$\varkappa_w$ relativna ukupna korist zbog smanjenja redukcije

λ

λ relativno povećanje investicija po jedinici duljine dovoda (IX poglavlja)

λ vodljivost materijala (X poglavlje)

μ

μ omjer između najmanje i prosječne mjesečne proizvodnje hidroelektrana (IV poglavlje)

μ omjer mjesečnih i ukupnih godišnjih gubitaka (X poglavlje)

ν

ν relativno povećanje opterećenja kotla

ϱ

ϱ faktor rezerve elektrana

ϱ_a faktor rezerve potrošača

σ

σ omjer maksimalnog opterećenja u kritičnom razdoblju i maksimalnog godišnjeg opterećenja

τ

τ relativno trajanje korištenja veličine izgradnje hidroelektrane

τ_h relativno trajanje opterećenja

τ_{hk} relativno trajanje konstantnog opterećenja termoelektrane u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja

φ

φ faktor snage

φ_n nazivni faktor snage

ω

ω kružna frekvencija

ω_F regulaciona sposobnost loženja kotla

ω_K regulaciona sposobnost kotla

Izdaje
Zajednica Jugoslovenske elekroprivrede

Urednik
COLJA VILKO

Tehnički urednik
MITROVIĆ PREDRAG

Omot i korice
KOLAROVIĆ BORIVOJE

Štampa i kliše
BEOGRADSKI GRAFIČKI ZAVOD

Štampanje u 1000 primjeraka završeno
februara 1966. godine