

1 Uvodna razmatranja

Energija i električna energija ili čime ćemo se baviti

Energija, energetske pretvorbe i procesi materijalna su osnova svake civilizacije, a oblici energije koji su dostupni, koji se rabe, određuju stupanj razvoja te civilizacije: tehnološki (i industrijski) razvoj civilizacije prestaje s iscrpljenjem izvora energije (*energetskih izvora*), prestaje s prestankom odvijanja „energetskih procesa“. „Naša“ (današnja, trenutačna) civilizacija počiva tako na **električnoj energiji** i na njezinoj pretvorbi u „korisne oblike energije“ i malo je vjerojatno da će bitno napredovati ne promijeni li se oblici energije na kojima se razvija.

*Energetskim procesima nazivamo procese preobrazbe jednih oblika energije u druge u tehničkim sustavima, a korisni su oblici energije oblici nužni za održavanje života ljudi: **mehanički rad (kraće rad), toplinska, kemijska i rasvjetna energija.***

(Što je mehanički rad, mehanika, nuklearna, kemijska, unutrašnja kalorička, toplinska energija itd., odnosno o svim za naša razmatranja važnim oblicima energije, detaljno ćemo govoriti kasnije.)

Uočimo li i činjenicu da i današnje („masovne“) komunikacije („elektrokomunikacije“) rabe električnu energiju, te da se na uporabi električne energije temelji i obuhvat, prijenos, obrada, uskladištenje, korištenje i prikaz informacija (što se ponekad naziva „procesiranje znanja“) to dostatno govori o važnosti opskrbljenosti električnom energijom, odnosno energijom općenito, budući da se električna energija dobiva transformacijom iz najrazličitijih oblika energije, i o važnosti energetske procesa: „proizvodnji“, prijenosu, razdiobi (raspodjeli) i uporabi (*primjeni, korištenju, iskorištenju, „potrošnji“*) električne energije (korisnih oblika energije), odnosno, i o važnosti tema kojima se bavi udžbenik.

1.1 Energija, eksergija, anergija

Riječi su proizvodnja i potrošnja energije (električne energije) stavljene u znake navoda budući da se prema jednom od temeljnih principa (aksioma, postulata, načela, zasada, zakona) svijeta u kojem postojimo, „**principu očuvanja energije**“, **energija ne može poništiti (potrošiti) ni stvoriti, već samo promijeniti svoj oblik.**

Ako je to tako, logično se nameće pitanje: otkud onda „**problem opskrbe energijom**“? Zašto govorimo o „**gubitcima energije**“ kad se energija ne može izgubiti, zašto o „**potrošnji energije**“ kad se energija ne može potrošiti? Uvjerit ćemo se, problem opskrbe energijom, pa dakle i električnom energijom, izvire iz jedne druge činjenice u našem svijetu: „**potrošnja eksergije**“, odnosno „**gubitci eksergije**“ (*eksergija je oblik energije koji se može, u idealnom slučaju, u potpunosti pretvoriti u korisne kao i u sve druge oblike energije*) neugodna su realnost naše stvarnosti; već i puko održanje naših života nemoguće je bez energije, no, ne bilo kakve energije već eksergije – oblika energije koji se po želji može pretvoriti u bilo koji drugi oblik energije (u korisne oblike energije). Za potrebe našeg opstanka, pogotovo kvalitetnijeg života, nužno je stalno proizvoditi eksergiju (poput električne energije koja je eksergija), budući da se, u što ćemo se uvjeriti, eksergija neprekidno troši rabljenjem (uporabom, primjenom, korištenjem, iskorištavanjem) u, praktički, bezbrojnim energetske procesima i načinima odnosno i kroz prirodne, spontane, samonikle, samopoticajne,

samoodržavajuće i nezaustavljive procese izjednačavanja početno nejednolikih raspodjela gustoće energije u jednoliku pretvarajući se u „**anergiju**“ i postajući time bespovratno izgubljena. (*Anergija je oblik energije koji se ne može pretvoriti niti u jedan drugi oblik energije pa, dakle, ni u eksergiju, ni u korisne oblike energije; za sva bića takav je oblik energije beskoristan – kao da niti ne postoji.*) Uobičajeni su pojmovi prema tome, kao što su „**proizvodnja energije**“, „**potrošnja energije**“ i „**gubitak energije**“, suprotni principu očuvanja energije jer se energija ne može niti proizvesti, niti potrošiti niti izgubiti. Nasuprot tome, što ćemo kasnije potanko razmatrati, „**proizvodnja eksergije**“, „**potrošnja eksergije**“, odnosno „**gubitak eksergije**“, u potpunom su skladu s tzv. „**glavnim stavcima termodinamike (prvim i drugim u ovom slučaju)**“, jer se u nepovratljivim (nepovratnim, ireverzibilnim) odnosno realnim procesima eksergija troši i gubi, pretvarajući se konačno i nepovratno u anergiju.

Rabit ćemo sintagmu „stavci termodinamike“, a ne „zakoni termodinamike“, budući da se tvrdnje što ih izriču temelje isključivo na iskustvu; nije ih moguće dokazati direktnim argumentom (argumentima), ne radi se, dakle, o zakonima. Uobičajeno govori se tako o nultom, prvom, drugom i trećem glavnom stavku termodinamike.

S druge strane pak, uvažavajući uvriježene izraze, i dalje ćemo govoriti o „**proizvodnji i potrošnji (električne) energije**“ znajući da se radi o eksergiji.

1.2 Električna je energija prijelazni oblik energije

Električna se energija (eksergija) proizvodi, prenosi, raspodjeljuje i troši, najvećim dijelom, u „**elektroenergetskom sustavu**“. Elektroenergetski se sustav sastoji od elektrana za proizvodnju električne energije (*„postrojenja za proizvodnju električne energije“: termoelektrana, u koje spadaju i nuklearne, geotermalne i solarne /„sunčeve“/ elektrane, hidroelektrana i vjetroelektrana*), rasklopnih postrojenja za razvod i transformaciju električne energije (aparati za uklapanje i isklapanje /prekidači i rastavljači/, transformatori, uređaji za zaštitu transformatora i vodova, uređaji za mjerenje radi kontrole pogona i obračuna energije, te uređaji za upravljanje uklopnim aparatima i za signalizaciju stanja pojedinih aparata), vodova za prijenos i vodova i kabela za raspodjelu (*razdiobu, distribuciju*) električne energije, različitih (mnogobrojnih) uređaja za vođenje, upravljanje, zaštitu, mjerenje, kontrolu i signalizaciju rada elektroenergetskog sustava, te potrošačkih uređaja (trošila), motora i aparata u kojima se električna energija pretvara u onaj oblik energije koji je potreban za održavanje ljudskog života i aktivnosti (mehanički rad, toplinsku, kemijsku i rasvjetnu energiju). Svi su dijelovi elektroenergetskog sustava električki ili magnetski među sobom tako povezani da električne prilike u jednom dijelu sustava ovise o prilikama u svim ostalim dijelovima. Primjerice, sve elektrane u sustavu rade paralelno povezane s točno istom frekvencijom; danas su u svim razvijenijim zemljama praktički sve elektrane spojene u elektroenergetski sustav bez obzira na vlasnike elektrana i vodova i bez obzira na organizacijske oblike „**elektroprivrede**“.

(*Elektroprivreda je grana gospodarstva koja se bavi proizvodnjom, prijenosom i razdiobom /distribucijom, raspodjelom/ električne energije i usklađivanjem njezine potrošnje.*)

Osim toga su i elektroenergetski sustavi mnogih (većine) zemalja jedni s drugima povezani, pa u tim slučajevima jedan takav (zajednički) elektroenergetski sustav pokriva više zemalja, cijeli kontinent. Današnji je elektroenergetski sustav stoga, najvjerojatnije, najkompliciraniji među tehničkim sustavima, kojima je zadatak opskrba

energijom, ikada izgrađen: izvan svake sumnje on je najveći, najrasprostranjeniji, najutjecajniji, najneophodniji i najskuplji takav tehnički sustav. Zašto? Najkraće, uz dosad spomenutu ulogu električne energije, zato jer je električna energija „**prijelazni oblik energije**“. Što to znači? Električna je energija oblik energije koja se očituje samo dok teče električna struja (bilo istosmjerna, bilo izmjenična), samo kada se energija elektromagnetskih polja pretvara u neki drugi oblik energije (mehanički rad, unutrašnju kaloričku, mehaničku, kemijsku i/ili rasvjetnu energiju). Pritom je električna energija jedno od najvažnijih svojstava elektriciteta a pojavljuje se u energetskim procesima odvajanja elektrona iz elektronskih omotača atoma. Odvajanje se može postići na različite načine uporabom energije (mehaničkog rada): elektromehaničkom energetskom pretvorbom, termoelektričnom, termoionskom, fotoelektričnom pretvorbom, neposrednom pretvorbom kemijske u električnu energiju u gorivnom članku, magnetohidrodinamičkim generatorom itd. Jedna je od (na)bitnih značajki električne energije što se ona pojavljuje samo u dinamičkim procesima, ona je stoga „prijelazni oblik energije“; ne može se uskladištiti (*akumulirati, sakupiti, nakupiti, nagomilati, zgrnuti, pobraniti, umnožiti na jednom mjestu*) u izvornom obliku nego se mora proizvoditi u trenutku kada je potrebna: npr., kada „upalimo“ televizor, PC ili svjetlo, pretvorbom (transformacijom) iz bilo kojeg oblika energije koji nije anergija. Zbog toga elektrane i cijeli elektroenergetski sustav trebaju biti izgrađeni tako da mogu trenutačno zadovoljiti potražnju za električnom energijom, odnosno, istog časa obustaviti pretvorbu nekog od mnogobrojnih oblika energije u električnu energiju kada, primjerice, „ugasimo“ televizor, PC, svjetlo, ...

Danas je električna energija vrlo važan (najvažniji) oblik energije (eksergije) jer je omogućila, po prvi puta u (poznatoj) povijesti čovječanstva, dovođenje energije (eksergije) na mjesto uporabe, na svaki kućni prag, tako da je svatko, doslovce svatko, u svoj njezinoj raznolikoj primjeni, može po volji jednostavno upotrebljavati služeći se različitim napravama i uređajima.

*Primjerice, osoba koja glača raspolaže sa snagom većom od snage šestoro volova i, za razliku od volova koje treba hraniti i koji tek oko 8% energije unesene hranom pretvaraju u korisni oblik energije (mehanički rad), beskonačnom (teoretski gledano) energijom (eksergijom). U posljednja se tri i pol desetljeća XX. st. svjetska potrošnja energije povećala tri puta, s bitno većim udjelom potrošnje električne energije. Najveće je povećanje zabilježeno u razvijenim zemljama, gdje je tehnički napredak, pa i porast proizvodnosti, većinom izravno ili neizravno povezan s uporabom električne energije. Između potrošnje električne energije te gospodarskog rasta i blagostanja postoji u velikom broju zemalja prepoznatljiv odnos. Na kraju tog razdoblja godišnja je potrošnja električne energije po stanovniku bila najveća u Norveškoj (više od 25.000 kWh), a najmanja u Kambodži (8 kWh). U SAD je ta potrošnja bila veća od 12.000 kWh, a u Hrvatskoj oko 3.000 kWh. Iako zemlje u razvoju predstavljaju tri četvrtine čovječanstva, one troše samo jednu četvrtinu ukupno iskorištene energije u svijetu i samo jednu desetinu ukupne električne energije. Električna je energija nedostupna približno dvjema milijardama ljudi (u nerazvijenim zemljama). Prema (nekim) predviđanjima, iz 1990. godine, do 2010. godine, u razvijenim će zemljama potrošnja **primarnih oblika energije** porasti 1,9 do 2,1 puta, a električne energije 2,4 do 2,5 puta. U zemljama u razvoju odgovarajući će porast biti 1,1 do 1,2, odnosno 1,2 do 1,4. Prema tim će predviđanjima, povezano s gospodarskim razvojem i brojnim drugim okolnostima, do 2050. godine, potrošnja primarnih oblika energije porasti 3 do 5 puta, a potrošnja električne energije 5 do 7 puta.*

Uz mehanički rad i mehaničku energiju, električna je energija jedini oblik energije koji se može neograničeno pretvarati u druge oblike energije; ona je eksergija. (Potpuna je

pretvorba međutim, istaknimo, moguća samo u povratljivim (*idealnim, povratnim, obratnim / obrtljivim / ,reverzibilnim*) procesima.) U usporedbi s pretvorbama drugih oblika energije (eksergije), konverzija je električne energije u korisne oblike, na mjestu na kojem se zbiva, najjednostavnija, najpouzdanija, najsigurnija, najbrža, najčistija, najudobnija, pa stoga u ukupnosti i najekonomičnija. Naime, električna se energija (eksergija), u usporedbi s drugim oblicima eksergije, najekonomičnije prenosi (na velike udaljenosti). Njezina važnost u općoj opskrbi energijom postaje još veća i sve veća jer će se, primjerice, u budućnosti, većina tzv. „**nekonvencionalnih primarnih oblika energije**“ moći iskoristiti tek nakon pretvorbe u električnu energiju.

1.3 Oblici energije

„**Primarni oblici energije**“ oblici su energije što se nalaze u prirodi, ili se u njoj pojavljuju, a svrstavaju se, prema nositeljima („**gorivima**“), u „**konvencionalne**“ (koji se danas uobičajeno i najčešće upotrebljavaju) i „**nekonvencionalne oblike energije**“ (čija uporaba nije još uobičajena).

Konvencionalni su oblici energije (točnije, njihovi nositelji): ogrjevno drvo, treset, ugljen, sirova nafta i prirodni plin (nazivaju se gorivima, a ugljen, sirova nafta i prirodni plin nazivaju se još i „**fosilnim gorivima**“), zatim vodotoci (potencijalna /gravitacijska/ energija vodotoka), nuklearna goriva (uranijski i torij) i vrući izvori, a nekonvencionalni: uljni škriljevci i bituminozni pijesak, plima i oseka, vjetar, valovi, Sunčevo zračenje, more, suhe stijene u Zemljinoj kori i laki atomi (energija fuzije).

S obzirom na oblik primarne energije radi se o ovim oblicima: **kemijska energija** (nositelji drvo, treset, ugljen, sirova nafta, prirodni plin, uljni škriljevci i bituminozni pijesak), **nuklearna energija** (nositelji uranij, torij, laki elementi upotrijebljivi za fuziju), **gravitacijska potencijalna energija** (nositelji vodotoci, valovi, plima i oseka), **kinetička energija** (vjetar), **unutrašnja kalorička energija** (nositelji vrući izvori, suhe stijene i more) i **energija zračenja (Sunčevo zračenje)**.

Osim podjele na konvencionalne i nekonvencionalne oblike energije, primarni se oblici energije mogu podijeliti i s obzirom na obnovljivost njihovih nositelja (goriva) u dvije skupine: primarni oblici koji se prirodno obnavljaju i oni koji se ne obnavljaju. „**Obnovljivi**“ su oblici: Sunčevo zračenje koje se neposredno iskorištava (*Sunčeva energija u užem smislu, jer je pretežita (golema) većina svih oblika energije na Zemlji u krajnjem posljedicama Sunčeve aktivnosti*), vodne snage, energija vjetra, plime i oseke, valova i unutrašnja kalorička energija mora, a „**neobnovljivi**“: fosilna goriva (ugljen, nafta i prirodni plin) i nuklearna goriva, Zemljina unutrašnja kalorička energija koja se pojavljuje na površini (vrući izvori), unutrašnja kalorička energija u Zemljinoj unutrašnjosti i laki atomi potrebni za fuziju.

Primarni se oblici energije mogu nadalje podijeliti, s obzirom na tehničku mogućnost i ekonomsku opravdanost iskorištavanja, u tri skupine: oblici energije za koje nije tehnički riješen način iskorištavanja; oblici energije za koje je riješen način tehničkog iskorištavanja, ali su oni – prema današnjem shvaćanju – ekonomski nepovoljni da bi se u većoj mjeri iskorištavali; i energijski oblici kojih je uporaba i ekonomski opravdana.

Nijedan od primarnih oblika energije koji se obnavljaju nije moguće transportirati onakav kakav se pojavljuje u prirodi, a većina primarnih oblika koji se ne obnavljaju

može se transportirati u prirodnom obliku. To vrijedi naročito za fosilna i nuklearna goriva koja danas čine znatan dio međunarodne trgovine.

Većinu oblika energije koji se obnavljaju nije moguće akumulirati (vjetar, plima i oseka, energija valova, Sunčeva energija), pa se njima valja služiti u času kad se pojavljuju. (Akumuliranje je energije vode (vodnih snaga) moguće, ali su za to potrebna velika ulaganja.) Nasuprot tome, primarni oblici energije koji se ne obnavljaju daju se uskladištiti bez većih poteškoća i zatim iskorištavati prema potrebama.

1.4 Uloga električne energije: čime ćemo se baviti

Uporabom se električne energije, što je iznimno važno, smanjuje štetan utjecaj energetskih pretvorbi na okoliš: izbjegava se iscrpljivanje prirodnih izvora koji se ne obnavljaju (minerali, fosilna goriva) i sprječava onečišćenje prirodnih izvora koji se ciklički iskorištavaju (zrak, voda, zemlja i sl.), kako ono ne bi premašilo granice prirodnog obnavljanja. Drugim riječima, uporaba električne energije omogućuje „održivi razvoj“.

(Ne postoji još uvijek opće prihvaćena definicija održivog razvoja. Najbliža je tome ona koja govori da je održivi razvoj onaj koji, zadovoljavajući potrebe današnjice, ne ugrožava mogućnosti zadovoljavanja potreba sutrašnjice.)

U ovom ćemo udžbeniku prvenstveno razmatrati samo one energetske pretvorbe i procese koji su temeljni za proizvodnju električne energije; procese koji se odvijaju u postrojenjima za proizvodnju električne energije: termoelektranama (nuklearnim, geotermalnim i solarnim elektranama), hidroelektranama i vjetroelektranama - do pretvorbe u mehanički rad. (Ostale procese, neophodne za rad /funkcioniranje/ elektroenergetskog sustava, izučavat će drugi predmeti i udžbenici.) Zbog cjelovitosti, međutim, i njihove sve veće važnosti u opskrbi električnom energijom, u drugom ćemo dijelu udžbenika opisati i procese „izravne, neposredne, direktne“ pretvorbe unutrašnjih oblika energije u električnu energiju (bez prethodne pretvorbe u toplinsku energiju): procese poput termoelektrična, termionska i fotoelektrična transformacija, neposredna transformacija kemijske energije u električnu (gorivna ćelija), magnetohidrodinamički generatori,...

Pritom se ne ćemo detaljnije baviti fizičkim izvedbama postrojenja; bavit ćemo se prvenstveno **pravilnostima koje upravljaju energetskim procesima preobrazbi energije** potanko gradeći sliku o energiji i opskrbi energijom pokušavajući odgovoriti i na pitanje **kako rješavati (riješiti) ili ublažavati (ublažiti) „problem opskrbe energijom“?**

Uočit ćemo, razmatrajući takve energetske procese, da se temelje na tvarima čija je uloga **preuzimanje** energije iz **sustava** (jednog ili više; pojam sustava definirat ćemo uskoro), **pohranjivanje (akumuliranje, uskladištavanje), prenošenje (transportiranje, transferiranje), preobražavanje (pretvaranje, transformiranje, konvertiranje, preoblikovanje)** i konačno **predaja** u drugi sustav ili sustave, odnosno okolicu. Primjerice, u „klasičnim (konvencionalnim)“ termoelektranama to je voda i vodena para, odnosno plin u termoelektranama s plinskim turbinama. U hidroelektranama - voda. U nuklearnim elektranama uz vodu i vodenu paru te plin to mogu biti organske tvari ali i kovina. U motorima s unutrašnjim izgaranjem, smjesa

plinova. To može biti i plazma u nekim transformacijama (magnetohidrodinamički generatori). Zajedničko je pritom međutim da je ta tvar, koju nazivamo **(radnim) medijem, posrednikom ili djelatnom tvari, fluid (tekućina)**, odnosno da je u **fluidnom (tekućem)** stanju: voda, vodena para, najrazličitiji plinovi odnosno smjese plinova, živa, rastaljena kovina ili organske tvari, itd.

*(Preporučena je hrvatska riječ za fluid tekućina. U tom slučaju govorimo, s obzirom na agregatno stanje fluida (tekućina), o **kapljevina** ili **plinovima**. Tekućine (fluidi), u kapljevitom agregatnom stanju, smještene u posudu, koju djelomično ispunjuju, poprimaju oblik posude i formiraju „slobodnu površinu“ na granici s okolišnom atmosferom, a izbačene u atmosferu, u obliku tankog mlaža, kapljevine se raspršuju formirajući sitne kapljice – otuda naziv; plinovi ne formiraju kaplje i, za razliku od kapljevina, šire se svakim raspoloživim im prostorom.)*

Morat ćemo stoga upoznati svojstva (*karakteristike, značajke, obilježja*) i ponašanje fluida u energetskim pretvorbama i procesima što se odvijaju u postrojenjima za proizvodnju električne energije u cjelini kao i u pojedinim podsustavima (dijelovima, elementima) tih postrojenja.

(Nuklearne procese u nuklearnim elektranama u ovim našim razmatranjima ne ćemo potanko izučavati, njima se bave drugi predmeti; upoznat ćemo ih samo do razine koja će nam omogućiti razumijevanje biti energetskih pretvorbi u nuklearnim elektranama kao i prijevorna pitanja povezana s radom nuklearnih elektrana.)

Sva ćemo naša razmatranja provesti, najjednostavnije i najlakše, oslanjajući se na neke od temeljnih principa (načela, zasada), na principe očuvanja, odnosno na neke zakonitosti materijalnog svijeta u kojem živimo:

- **princip očuvanja (održanja, konzervacije) mase (točnije, princip očuvanja mase i energije);**
- **princip očuvanja količine gibanja;**
- **princip očuvanja momenta količine gibanja;**
- **princip očuvanja energije (točnije, princip očuvanja mase i energije) - prvi glavni stavak termodinamike;**
- **princip rasta entropije (drugi glavni stavak termodinamike) i**
- **jednadžbe stanja tvari.**

Zašto ćemo se služiti principima očuvanja? Zbog toga jer ti principi izriču da određene „stvari“ moraju ostati nepromijenjene (neizmijenjene) bez obzira na to kakvi su se procesi odvijali u postrojenjima za proizvodnju električne energije olakšavajući tako analize pretvorbi energije i energetskih procesa. No, prije nego li započnemo s upoznavanjem fluida, energetskih pretvorbi i procesa, morat ćemo odgovoriti na pitanje što je energija.

1.5 O važnosti opskrbe energijom

Živimo u razdoblju kada se ponovno, možda najočiglednije u (poznatoj) povijesti čovječanstva, željeli to ili ne, sučeljavamo s dva životna tijeka, dakle s tijekovima o kojima ovisi naš opstanak i opstanak naše civilizacije: s tijekom energije i s tijekom znanja, odnosno informacija (obavijesti). Budući da je i tijek znanja u osnovi energetski, to dostatno govori o važnosti energije i važnosti opskrbljenosti energijom, a potvrđuje se kroz ulogu elektroenergetskog sustava.

(Elektroenergetski je sustav najveći, najrasprostranjeniji, najkompliciraniji (najsloženiji), najneophodniji, najskuplji i najutjecajniji tehnički sustav upravo zbog toga jer je opskrba energijom zahtijevanih oblika opstojni temelj gospodarstva (prosperiteta, napretka i blagostanja) svake zemlje.)

Da bi se proširila slika o važnosti opskrbe energijom i ulozi iskorištavanja energije, na današnjem stupnju razvoja, često se navodi podatak da je u posljednjih tridesetak godina prošlog stoljeća iskorišteno više energije negoli u tijeku cijelog povijesnog razdoblja prije toga, kao i podatak da je u zadnjih dvadesetak godina prošlog stoljeća potrošeno više sirove nafte negoli u cijelom dotadašnjem povijesnom razdoblju, te predviđanje da će se u još kraćem razdoblju u budućnosti to ponovno dogoditi iako će, kako se očekuje, relativna potrošnja nafte opadati. Predviđa se dakle, promatrajući svijet u cjelini, daljnje veliko povećanje potreba za energijom usprkos istodobnom očekivanju da će u najrazvijenijim zemljama potrošnja energije praktički stagnirati ili da će se ostvarivati uz vrlo mali porast. Naime, nekoliko činjenica upućuju na daljnji porast potrošnje energije. Prvo, maleni se porast potrošnje energije očekuje jedino i samo u zemljama s vrlo velikom uporabom energije po stanovniku, nekoliko puta većoj od prosječne u svijetu, dok se u svim drugim zemljama očekuje bitan porast potrošnje energije budući da je porast iskorištavanja energije u svijetu, kao cjelini, uvjetovan s jedne strane porastom stanovništva, a s druge strane razvojem zemalja koje se danas smatraju nerazvijenim ili zemljama u razvoju. Drugo, budući da je za održanje današnje civilizacije presudno ispuniti ova dva zahtjeva: izbjeći iscrpljivanje prirodnih izvora koji se ne obnavljaju (minerali, fosilna goriva), i spriječiti onečišćenje prirodnih izvora koji se ciklički iskorištavaju (zrak, voda, zemlja i sl.) kako ono ne bi premašilo granice prirodne regeneracije, problem se svodi na energetske. Problem se, naime, očuvanja, odnosno smanjenja trošenja rezerva, svodi na činjenicu da se sve osnovne tvari mogu iskorištavati u zatvorenom ciklusu, ali je za njihovu ponovnu pripremu potrebna energija. Isti se problem pojavljuje pri pročišćavanju zraka i vode, pri dobivanju novih količina slatke vode (npr., iz mora desalinizacijom). Treće, to isto vrijedi i za povećanje proizvodnosti u poljoprivredi (natapanje, mehanizacija, proizvodnja umjetnih gnojiva) budući da će se, u svjetskim razmjerima, uz povećani broj stanovnika, pojaviti (već se pojavio u određenoj mjeri) i problem dostatne proizvodnje hrane, dakle i opet energije. Naglasimo li zatim i da zadovoljenje potreba za energijom zahtijeva velika ulaganja i znatnu proizvodnju opreme za energetska postrojenja, uređaje i energetska trošila, zahtijeva, dakle, u osnovi, energiju, bit će jasno da će, zbog ključne pozicije energije kao, moglo bi se reći, univerzalnog izvora, i zbog razvoja nedostatno razvijenih područja, potrebe energije po stanovniku još dugo rasti, vjerojatno i nakon što se, iz bilo kojeg razloga, stabilizira broj stanovnika na našem planetu. Opskrba će i gospodarenje energijom zbog toga postajati sve važnijim područjem bavljenja i istraživanja tim važnijim jer zadovoljenje potreba za energijom izaziva, i izazivat će još više u budućnosti, političke sporove i sukobe budući da su i nalazišta pojedinih oblika energije i sirovina nejednoliko geografski raspodijeljena i ograničena, a u prošlosti se ta ograničenost nije uzimala u obzir. To je bilo i opravdano sve dok je iskorištavanje bilo malo u odnosu na rezerve, pa su rezerve izgledale neiscrpljive. Danas međutim, kad je iskorištavanje nekih oblika energije i sirovina dostiglo takvu razinu da se procjenjuje da će zalihe biti iscrpljene i za manje od stotinjak godina, mora se postupati oprezno i racionalno. Drastični naime primjeri posljedica nepostojanog i nedostatnog dobavljanja energije, u našem dobu, zabilježeni u razdoblju drugog svjetskog rata i zatim za vrijeme tzv. sueske krize (1956.) i energetske krize (1973.) kada je započelo povećavanje cijena nafte, te u razdoblju nakon 1979. godine (iranska revolucija) i 1980. godine (iračko-iranski sukob) koje

bilježi daljnja povišenja cijena nafte, trenutačna zbivanja u Iraku i s Iranom, te, napokon, naše vlastito iskustvo, vezano uz najteže i najtragičnije događaje u Republici Hrvatskoj, u razdoblju nakon 1991. godine, kad je počela srpsko-crnogorska agresija s golemim razaranjima, između ostalog, i energetske objekata, upućuju na to.

Posljedice su pritom nedostatka energije u bilo kojem razdoblju povijesti čovječanstva uvijek (u osnovi) iste potvrđujući da je energija doista temelj svake civilizacije te da se ona bitno mijenja ili nestaje ugrožena li je opskrba energijom. Posljednjih godina prošlog stoljeća, i prvih ovog, ta iskustvena činjenica postaje sve više neugodnom spoznajom dosad nezainteresiranog mnoštva. Svjedoci smo, ponovno i ponovno, "krize energije" koja traje ili prijeti neprekidno od 1973. godine i biva tek kroz kraća međurazdoblja, tu i tamo, nakratko otklonjena, potisnuta ili ublažena. Zamislimo li na trenutak revoluciju, recimo, u Saudijskoj Arabiji, ili neki novi sukob među arapskim zemljama dobavljačicama nafte, ili sukob u koji su uvučene, i svijet će se, najvjerojatnije, naći u krizi kakvu moderna povijest čovječanstva ne pamti niti poznaje.

9.XI.1965. godine tridesetak je milijuna stanovnika sjeveroistočnog dijela SAD-a, površine veće od 208.000 kvadratnih kilometara (ploština je kopnenog dijela Hrvatske 56.414 kvadratnih kilometara), ostalo bez električne energije. Prekid je opskrbe trajao 12 sati.

13.VII.1977. cijeli je New York utonuo u potpuni mrak. Udar munja u ključnu trafostanicu izazvao je „raspad“ elektroenergetskog sustava (prekid opskrbe električnom energijom) što je najveći američki grad bacilo u neopisivi kaos s brojnim nesrećama, ubojstvima i pljačkama, (ponovno) pokazavši svu nemoć moderne civilizacije bez električne energije.

14.VIII.2003. 50 je milijuna ljudi sjeveroistočnog dijela SAD-a i istočne Kanade ostalo bez napajanja električnom energijom: 40 milijuna u 8 država SAD-a i 10 milijuna u kanadskoj provinciji Ontario; procijenjene štete izazvane prekidom opskrbe iznose 6 milijardi američkih dolara.

28.IX.2003. raspad elektroenergetskog sustava pogađa Italiju (s iznimkom otoka Sardinije) i dio Švicarske (ženevski kanton). Prekid je opskrbe električnom energijom trajao 9 sati u Italiji (neka su područja Italije, 5%, ostala bez električne energije i 24 sata), 3 sata u Švicarskoj, obuhvaćajući 56 milijuna ljudi. (Brzom reakcijom, odvajanjem elektroenergetskog sustava od europskih, Hrvatska je izbjegnula raspad svog elektroenergetskog sustava.)

I uopće, 2003. je godina, zbog brojnih razloga o kojima ne ćemo govoriti u ovom udžbeniku, „obilovala“ većim brojem raspada elektroenergetskih sustava odnosno raspada dijelova elektroenergetskog sustava. Uz dosad spomenute, ove su još zemlje pretrpjele raspad (dijelova) svojih elektroenergetskih sustava: 28.VIII. London, 500.000 ljudi ostalo je bez napajanja električnom energijom; 2.IX. 5 država (od njih 13) Malezije i glavni grad Kuala Lumpur; 23.IX. 5 milijuna ljudi u Danskoj i južnim dijelovima Švedske pogodeno je raspadom danskog i dijela švedskog elektroenergetskog sustava; 20.XII. San Francisco je ostao „u mraku“.

Od 1965. godine, do (zaključno) 2005., zbilja su se 23 raspada elektroenergetskih sustava diljem svijeta. Riječ je pritom samo o raspadima većih razmjera koji, izazvani najrazličitijim djelovanjima i uzrocima, dijelom i izvan elektroenergetskih sustava, iznova i iznova upozoravaju na neopstojnost naše civilizacije bez raspolaganja s električnom energijom.

Posljedice neopskrbljenosti energijom uvijek, uglavnom, ukazuju na ovo:

- nedostatak energije, posebice za vrijeme rata i u poslijeratnom razdoblju, ili u razdobljima sukoba u koje su „uvučene“ zemlje opskrbljivača naftom ili prirodnim plinom, ugrožava redoviti život današnjeg društva pa radi li se i o relativno malom pomanjkanju energije: i najmanja ograničenja u potrošnji energije uzrokuju velike poteškoće u proizvodnji, prometu i kućanstvima;

- postoji jasno uočljiva korelacija između potrošnje energije u svakoj zemlji, s jedne strane, i ukupne proizvodnje i bogatstva zemlje, s druge strane. Ta je korelacija razumljiva jer ukupna proizvodnja ovisi o raspoloživoj energiji pa je energija doista jedan od najbitnijih preduvjeta za prosperitet i snagu bilo koje zemlje. (*Primjerice, proizvodnja je žita u SAD porasla od 1945. godine do 1970. godine 2,4 puta, a potrošnja energije za tu proizvodnju 3,1 puta.*);
- pouzdana je i sigurna opskrba energijom, između ostalog, uvjetovana i međunarodnom trgovinom različitim oblicima energije, što znatno utječe na bilance novčanih (deviznih) sredstava zemlje i time, povratno, na pouzdanost opskrbe potrošača energijom.

Dostatna opskrba energijom sadrži stoga tri čimbenika koji se ne mogu zaobići:

- cijenu energije i troškove opskrbe energijom: da bi, naime, bilo koji proizvod uopće mogao biti konkurentan na međunarodnom tržištu, proizvodnja se mora, pokraj ostalog, opskrbljivati energijom po što nižoj cijeni;
- raspoloživost deviznim (novčanim) sredstvima: njihova ograničenost zahtijevat će u protivnom traženje dugoročnih rješenja uz prioritarno iskorištavanje vlastitih energetske izvora, pa i onda kad je to ekonomski promatrano nepovoljnije; i
- pouzdanost i sigurnost opskrbe energijom: to upućuje također na vlastite energetske izvore ili na one oblike energije koji se mogu bez većih troškova uskladištiti za dulje vremensko razdoblje (nuklearna energija primjerice).

Mišljenja se pak o važnosti i prioritetu ovih triju aspekata često mijenjaju, a prihvaćanje jednog na račun ostalih uzrokuje bitne promjene u praktičnoj energetske politici utječući tako i na razvoj energetske grane.

1.6 Kako je počelo, a kako je danas

Ukupna je i jedina potrošnja energije homo sapiensa bila energija unesena hranom: 8 MJ po ljudskom biću u danu; isključiva je preokupacija homo sapiensa bila nalaženje hrane. Danas ljudsko biće troši hraneći se, u prosjeku (svjetski prosjek), usprkos zaprepašujućim brojevima gladnih i umiranja od gladi svakodnevno, oko 8,4 MJ, a stanovnik "zapada" (razvijenih zemalja) oko 12,6 MJ energije.

(Neandertalac je, živeći u vrlo hladnoj klimi, trošio mnogo više energije u hrani: oko 42 MJ.)

Ukupna je potrošnja energije, međutim, po stanovniku planeta 175 MJ po danu.

(Pritom stanovnik SAD-a troši 950 MJ: kada bi svi stanovnici Zemlje trošili toliko energije morali bismo, u ovom trenutku razvoja, raspolagati s nekoliko planeta poput Zemlje.)

Da bismo spoznali što znači tih 175 MJ po stanovniku planeta dnevno, provedimo jednostavni račun. Mi, "električari", volimo energiju iskazivati u Wh ili kWh, MWh, GWh ili TWh.

($1W = 1J/s$; $1Wh = 1J/s \cdot 3600s = 3600J$; $1kWh = 3600 \cdot 10^3J = 3,6 \cdot 10^6J = 3,6MJ$. Što znači raspolagati s električnom energijom (eksenergijom) iznosa $1kWh$? S tom se eksenergijom podiže 50 kg (vreća cementa) 7,3 km u vis. Koliko bi energije (hrane i pića) i vremena trebalo čovjeku da takvu vreću odnese na planinu visoku 7,3 km?)

Ljudsko biće treba 3500 Wh (12,6 MJ) energije u hrani da bi sa snagom od 60 W moglo raditi 5,5 sati dnevno. (Više ne može, umrlo bi od iscrpljenosti.) Energetski je stupanj djelovanja pritom oko 10%. Drugim riječima, tek približno 10% energije unesene hranom može čovjek pretvoriti u mehanički rad. (*Očito, rad, mehanički rad, i energija u hrani različiti su oblici energije, različiti po "kvaliteti", po sposobnosti preobrazbe u druge oblike energije: o tome ćemo govoriti kasnije.*) Odnosno, kada bismo 175 MJ po danu osiguravali ljudskim radom za svakog bi stanovnika Zemlje trebali raditi 147 robova. (A tko bi proizvodio hranu za te robove? Otkuda potrebna energija za proizvodnju hrane?)

Vrlo je jasno dakle, s energetskog stajališta, zašto su propale robovlasničke civilizacije poput egipatske, grčke, rimske itd.: opskrba energijom temeljena na ljudskom radu energetski je neodrživa: fizički je ljudski rad energetski preskup, nemoguć. (Upravo zbog toga mnoge se okolnosti karakteristične za ta razdoblja bitno razlikuju od današnjih: primitivni je čovjek (homo sapiens) živio, u prosjeku, 18 godina, stari Egipćanin 29, stari Rimljanin 22. (Europljani su u XIX. stoljeću u prosjeku živjeli 37 godina, u XX. 70, dok se očekuje da će u XXI. stoljeću živjeti 120 godina.) U vrijeme Gaja Julija Cezara (100. - 44. god.pr.Kr.) na Zemlji je živjelo samo 150 milijuna ljudi.)

U okvir opskrbe energijom ne uključuje se problem prehrane iako prehrambeni proizvodi sadrže energiju neophodnu za održanje života ljudi i životinja. Vrijednost je hrane, naime, mnogo veća od vrijednosti goriva. Tako, primjerice, pšenica ima energetsku vrijednost koja je samo polovica količine energije pohranjene u kamenom ugljenu, ali joj je na tržištu novčana vrijednost mnogostruko veća, dakako za jednaku masu. Drugim riječima, jednaka količina energije u pšenici vrijedi bitno više od iste količine energije pohranjene u ugljenu. Pritom se za proizvodnju jedne tone žita (u SAD) troši nešto manje od 1700 kWh energije; većim se dijelom radi o potrošnji eksergije. (Usporedbe radi, potrošnja je električne energije po stanovniku u Hrvatskoj godišnje nešto malo veća od 3000kWh u ovom trenutku, 2006. godina.)

Opravedani su razlozi da se problem prehrane odijeli od problema opskrbe energijom. Prehrana je, naime, specifični oblik energije koji mora imati posebna i točno određena svojstva: derivati nafte, npr., nisu upotrebljivi kao hrana premda se radi o istom obliku uskladištene energije, kemijskoj energiji. Nadalje, prehrambeni proizvodi imaju, s obzirom na životne potrebe, bitnu prednost pred svim drugim oblicima energije. Zbog toga se ne uspoređuju, npr., potrebne količine energije (za natapanje, obradu zemljišta, umjetna gnojiva, zaštitna sredstva i žetvu) za proizvodnju pšenice s energetskom vrijednošću proizvedene pšenice, jer se radi o oblicima energije koji se ne mogu međusobno uspoređivati, pa se stoga potrebna energija za prehranu razmatra odvojeno od svih drugih energetskih potreba.

Naglasimo na kraju ovog dijela razmatranja ponovno nezamjenjivu ulogu električne energije u današnjoj opskrbi energijom: otkrićem je električne energije po prvi puta u povijesti čovječanstva omogućeno ljudskom biću („modernom čovjeku“) da, na krajnje jednostavan način, raspolaze s (teoretski, pa i praktički) golemim (beskonačnim) količina energije (eksergije) što je i, posljedično, izazvalo veliko povećanje potrošnje energije (eksergije).

1.7 O energetsom i elektroenergetskom sustavu, energetici i elektroenergetici

Energetski se sustav, a posebice elektroenergetski sustav, svojom prirodom razlikuje od većine drugih tehničkih sustava. Nužno je stoga, tražeći načine dostatne, što jeftinije, pouzdane i sigurne opskrbe energijom, istaknuti najprije najbitnije značajke oba sustava.

Temeljna je djelatnost energetskeg sustava zadovoljiti sustav potrošača (kupaca) toliko gospodarstveno svrsishodno koliko je to moguće unutar razumske granice neprekidnosti i kakvoće (kvalitete). Poblize ta se djelatnost opisuje zadatkom dobavljanja energije zahtijevanog oblika, pa, dakle, i pretvorbom primarne energije u korisnu i raspodjelom do konačnog potrošača, te je u načelu određena s nužnošću pronalaženja optimalnog rješenja opskrbe, što ovdje znači najmanje štetnog rješenja, uz uvažavanje pritom zahtjeva poput: dostatna, pouzdana, kvalitetna i ekonomična (jeftina, štedljiva, racionalna) opskrba energijom promatranog područja u predviđenom razdoblju, ali i uz razboritu (racionalnu) uporabu energije od strane potrošača i očuvanje okoliša.

Teškoće nalaženja zadovoljavajućeg, najmanje štetnog (optimalnog) rješenja izviru, između ostalog, i iz odnosa među zahtjevima; svaki od zahtjeva ovisan je o drugima. Na primjer, pouzdana i sigurna opskrba energijom ovisi o zalihosti i pričuvi u sustavu, o troškovima primijenjene tehnologije za pretvorbu, prijenos, razdiobu i potrošnju energije, ali i o, u rastućoj mjeri, zahtjevima potrošača (kupaca), odnosno cijelog društva. Prevladavanje svih teškoća i nalaženje optimalnog rješenja zadatak je *ENERGETIKE* odnosno i *ELEKTROENERGETIKE*. Pritom, najopćenitije promatrano, *ENERGETIKU* smatramo znanošću (skupom znanstvenih disciplina) koja se bavi izučavanjem energije, njenih izvora, tehničkog korištenja izvora energije i svega što je s time u svezi:

- procesima pretvorbe, preobrazbe, transformacije, ili, kako se još govori, konverzije različitih oblika energije u traženi, zahtijevani oblik, prijenosom i razdiobom energije, i
- ekonomskim iskorištavanjem energetskeg izvora i energije (postupcima njezine racionalne uporabe) odnosno i ekonomskom raspodjelom i primjenom energije u različite svrhe uz očuvanje okoliša (razmatranje utjecaja i posljedica proizvodnje i iskorištavanja energije na okoliš, odnosno, ekološke prihvatljivosti uporabe energije).

Tako shvaćena znanstvena disciplina, energetika, sadrži ovisnosti koje vrijede kako za najvažnije primarne oblike energije, kao što su vodne snage (potencijalna energija vodotoka) i goriva u širem smislu (dakle i nuklearna goriva), tako i naročito za električnu energiju (eksergiju) kao najvažniji od transformiranih oblika energije. Električna energija, naime, kao transformirani oblik energije fosilnih goriva, nuklearne energije, hidroenergetskog potencijala, vjetra, valova, Sunca itd, predstavlja nerazdvojni dio i, po svemu sudeći, najbitniji dio energetike na današnjem stupnju razvoja znanosti, tehnologije i tehnike, budući da je to oblik energije na kojem počiva naša (trenutačna) civilizacija. Zbog toga se u okviru energetike razvija specijalizirana znanstvena disciplina, *ELEKTROENERGETIKA*, koja se u područjima elektroprivrede odnosi na istraživanje, studiranje, planiranje, projektiranje, izgradnju,

vođenje i upravljanje, te eksploataciju elektroenergetskih objekata (sustava) koji ulaze u jedinstveni tehnološki proces proizvodnje, prijenosa, razdiobe i potrošnje električne energije. (*Danas nije više posve jasno je li je elektroenergetski sustav podsustav energetskog sustava ili obratno.*) Razvoj je elektroenergetike svake zemlje tijesno povezan s razvojem ostalih grana energetike i stoga se ne može promatrati odvojeno tim više što je pokraj toga kako elektroenergetika tako i energetika povezana sa cjelokupnim ekonomskim i društvenim razvojem, dakle povezana sa skoro cjelokupnim životom i razvojem zemlje na gospodarskom, vojnom, društvenom i privatnom području te i s nizom znanstvenih, tehničkih, tehnoloških, ekonomskih, financijskih, političkih, ekoloških itd. čimbenika. Elektroenergetika je stoga danas klasična elektrotehnika proširena mnogim najsuvremenijim spoznajama i područjima istraživanja:

- teorijom vođenja i upravljanja složenim sustavima;
- metodama optimiranja i racionalizacije, regulacije i automatizacije;
- teorijom pouzdanosti, informacije, ekspertnih sustava;
- metodama očuvanja i zaštite ljudskog okoliša, metodama racionalnog korištenja energije;
- različitim ekonomskim metodama itd.

Sažeto rečeno, osnovni se zadatak i problem razvoja elektroenergetike, slično kao i energetike, nekog područja svodi na određivanje optimalnog rješenja dostatne, pouzdane, kvalitetne i ekonomične opskrbe promatranog područja električnom energijom i snagom u zahtijevanom razdoblju, ali uz racionalnu uporabu električne energije i snage od strane potrošača i očuvanje okoliša.

Razmotrimo postavljene uvjete.

- 1) "dostatna opskrba" energetska je (ali i ekonomska) kategorija koja predstavlja nužnost da se bilo kojem potrošaču osigura nesmetan razvoj s obzirom na količinu potrebite električne energije; ne smije se dogoditi da je, u bilo kojem trenutku, bilo kojem potrošaču (kupcu), električna energija nedostupna ma o kojojgod se količini radilo;
- 2) "pouzdana opskrba" matematički je pojam teorije vjerojatnosti (i danas već samostalne znanstvene discipline, „teorije pouzdanosti“), što znači da treba predvidjeti racionalnu vjerojatnost nesmetane opskrbe električnom energijom potrošača i u slučajevima nenadanih kvarova i ispada iz pogona pojedinih dijelova elektroenergetskog sustava i elemenata ili u slučajevima drugih uzroka neredovite opskrbe električnom energijom;
- 3) "kvalitetna opskrba" u ovom je smislu elektrotehnički pojam što znači da vrijednosti frekvencije i napona moraju biti unutar dopuštenih granica budući da su njihove zahtijevane vrijednosti neophodan uvjet za ispravni rad električnih aparata i uređaja i to kako proizvodnih tako i potrošačkih;
- 4) "ekonomična opskrba" ekonomska je ali i tehnička kategorija što predstavlja težnju da troškovi proizvodnje, prijenosa i razdiobe električne energije, tj. cijelog procesa uključivo sve do potrošača (kupaca), budu što niži. Pod pojmom "ekonomičnost" podrazumijevamo ekonomičnost s obzirom na elektroenergetski sustav kao cjelinu. (*Elektroenergetski je sustav (EES), ponovimo, skup elektrana, transformatorskih stanica, dalekovoda (prijenosnih mreža), razdjelnih mreža i potrošačkih postrojenja, uređaja i aparata, u kojem mora biti u svakom trenutku*

ostvarena točno tolika proizvodnja električne energije koliko traže potrošači.) Na mrežu se EES-a potrošači (trošila) priključuju onako kako žele, u trenutku kada to žele, praktički bez ikakvih ograničenja, a EES mora biti sposoban zadovoljiti svaku potražnju (potrošnju električne energije) koja se može pojaviti. Dakako, ta potražnja ima stoga stohastički (vjerojatnosni) karakter i može se, pogodnim metodama, s više ili manje sigurnosti (pouzdanosti), predvidjeti. To vrijedi i za dinamiku razvoja potražnje u duljem vremenskom razdoblju i raspored te potražnje za dan ili više dana unaprijed. Takve su analize potrebite da se pravodobno predvidi neophodna gradnja novih elektrana (izgradnja je elektrana dugotrajna), vodova, transformatorskih stanica i razdjelne mreže, odnosno da se predvidi za idući dan, odnosno iduće dane, rad pojedinih agregata (pogonskih strojeva i sinkronih generatora) u elektranama koji će biti, uz zahtijevanu rezervu (predviđa se mogućnost kvara agregata, vodova itd.) sposobni zadovoljiti očekivanu potražnju jer je, ističemo, kontinuiranost (neprekidnost, stalnost) opskrbe potrošača kvalitetnom električnom energijom osnovni zadatak EES-a. Pomanjkanje električne energije stvara poremećaje ne samo u industrijskoj proizvodnji nego i u životu stanovnika. Štete koje nastaju zbog pomanjkanja električne energije često su i stotinjak puta veće od cijene (nedostavljene, neisporučene) električne energije. Međutim, i pokraj toga EES ne treba izgraditi tako da se postigne potpuna pouzdanost opskrbe potrošača, jer bi to toliko povećalo investicije za gradnju elektrana i drugih dijelova EES-a da bi se više povećali troškovi u EES-u od očekivanih šteta zbog pomanjkanja električne energije. Potrebno je, dakle, odrediti "racionalnu" pouzdanost opskrbe potrošača i svjesno preuzeti rizik manjka energije u prilikama koje se vrlo rijetko događaju i ponavljaju uzrokujući prekid opskrbe električnom energijom. Ta "racionalna" pouzdanost ovisi o strukturi elektrana u EES-u (udio hidroenergije) i strukturi potrošača. Analiza mogućnosti proizvodnje električne energije u EES-u predstavlja osnovu za određivanje te pouzdanosti uzimajući pritom u obzir promjenu hidroloških prilika, oscilacije potrošnje u tijeku godine i raspoloživost (pouzdanost) elektrana. Izgradnja EES-a mora slijediti razvoj (zahtjeve) potrošnje električne energije. To je trajan i neprekidan zadatak jer, kako dosadašnje iskustvo pokazuje, nema povećanja industrijske proizvodnje ni povećanja društvenog proizvoda (standarda) bez povećanja potrošnje električne energije. Daljnji razvoj EES-a traži, međutim, vrlo velike investicije. Nužna je stoga detaljna analiza prilika u EES-u kojom će se odrediti optimalni redoslijed gradnje elektrana, s tim da se najprije grade elektrane koje daju najbolje efekte u EES-u, i optimalna snaga elektrana. Nadalje, u radu se EES-a pojavljuje međusobni utjecaj svih elektrana i cijele mreže (prijenosne i razdjelne), pa je najčešće moguće zadovoljiti potražnju za električnom energijom bezbrojnim kombinacijama agregata i najrazličitijom raspodjelom opterećenja među elektranama i agregatima. O toj raspodjeli opterećenja među elektranama ovise promjenljivi troškovi u EES-u, a to su praktički troškovi goriva; primjenom se metoda optimizacije mogu postići fascinantne uštede. Detaljno poznavanje odnosa stoga u EES-u i detaljne analize tih odnosa i prilika u EES-u osnova su i za ekonomičnu (racionalnu) izgradnju EES-a i za njegovu optimalnu eksploataciju;

- 5) "racionalna uporaba električne energije i snage" od strane potrošača tehnička je ali i ekonomska kategorija što se svodi na ekonomiziranje sa stajališta potrošača (kupaca električne energije) ali i na ekonomiziranje u odnosu na

zahtjeve EES-a; ekonomiziranje glede vršnog opterećenja (maksimalne potražnje električne energije u danu), jalove snage i energije, intenzivnije potrošnje u doba nižih opterećenja i dr.

1.8 O posebnostima elektroenergetike i elektroenergetskog sustava

Proizvodnja, prijenos, razdioba i potrošnja (uporaba) električne energije sadrže niz svojstava, značajki odnosno obilježja koje izdvajaju elektroenergetiku od ostalih grana energetike odnosno drugih sličnih gospodarskih grana. Elektroenergetika postavlja, naime, za svoja istraživanja, planiranja, projektiranja, izgradnju i eksploataciju toliko složenu tehničko-energetsku i ekonomsko-financijsku problematiku kakva se ne susreće niti u jednoj drugoj gospodarskoj grani.

Upozorimo na posebnosti svojstava ove grane energetike.

Prva je i najvažnija sadržana u činjenici da se proizvodnja električne energije, njen prijenos, razdioba i pretvorba u druge oblike energije događaju u, praktički, jednom te istom trenutku: električna je energija prijelazni oblik energije. Drugim riječima, električna se energija ne može akumulirati, uskladištiti, nagomilati, sakupiti, pohraniti već se mora proizvoditi (transformacijom iz nekog drugog oblika energije) samo onda kada to zahtijevaju potrošači (kupci); dakle, u svakom trenutku mora biti zadovoljena relacija:

$$\text{proizvodnja} = \text{potražnji (potrošnji)} + \text{ukupni gubici u sustavu.}$$

Upravo ta osobitost pretvara EES, čiji pojedini dijelovi mogu biti međusobno prostorno udaljeni tisućama kilometara, u jedinstveni složeni mehanizam; ova istodobnost proizvodnje i potrošnje električne energije važi za bilo koji kratki vremenski razmak, tj. u bilo kojem trenutku u EES-u postoji (odgovarajuća) ravnoteža za djelatnu odnosno jalovu snagu. Neuravnoteženost između ukupne snage elektrana i ukupne snage potrošača u sustavu ne smije postojati: smanjuje li se potražnja potrošača valja istodobno smanjivati proizvodnju elektrana. Međutim, treba upozoriti i naglasiti da se pritom može promijeniti kvaliteta električne energije, dakle, promijeniti vrijednosti napona i frekvencije, što, kao nepoželjnu pojavu, treba spriječiti.

Druga je svojstvenost (osebujnost) elektroenergetike velika brzina odvijanja prijelaznih procesa u EES-u. Valni procesi javljanja viših napona radi prijelaznih pojava pri isklapanju, uklapanju i atmosferskim pražnjenjima, procesi povezani s kratkim spojevima i oscilacijama u sustavu, rušenju stabilnosti itd, odvijaju se tolikom brzinom da nužno zahtijevaju primjenu automatskih uređaja koji, svojom brzinom djelovanja, moraju osigurati neophodno uspješno odvijanje prijelaznih procesa.

Treća je osobitost elektroenergetike činjenica da proizvodnju i potrošnju radne električne energije izmjenične struje neminovno prati i proizvodnja i potrošnja jalove električne energije i snage kao posebne specifičnosti u odnosu na ostale oblike energije.

Četvrta je zasebnost postojanje stalne i velike neravnomjernosti potražnje električne energije tijekom godine, mjeseca, tjedna, dana pa i sata.

Peta je osobitost da postoji isto tako stalna i velika neravnomjernost proizvodnje hidroelektrana, vjetroelektrana i solarnih elektrana ovisna o promjenljivosti dotoka

vode, vjetra i Sunčeva zračenja (oblačnosti) tijekom godine, mjeseca, tjedna, dana pa čak i sata.

Šesta je značajka iznimno velika složenost (kompliciranost) elektroenergetskih i električnih proračuna koji su neprovedivi bez uporabe kako elektroničkih i procesnih računala tako i specijalnih računskih strojeva: npr, mrežnih i diferencijalnih analizatora, mikro-modela mreža, specijalnih uređaja za određivanje ekonomske raspodjele opterećenja među elektranama i dr., i, konačno,

sedmo je bitno svojstvo elektroenergetike sadržano u povezanosti s, doslovce, svim granama gospodarstva što znatno otežava izradbu njenog plana razvoja. Naime, prigodom planiranja EES-a, ili pojedinih njegovih dijelova, nužno je planirati istodobno i razvoj ostalih grana energetike kao i cjelokupnog gospodarstva, istraživati porast broja stanovnika, razvoj gradova i drugih naselja, razvoj životnog standarda itd.

1.9 O šest „naj“ elektroenergetskog sustava

Elektroenergetski je sustav danas još uvijek najveći, najrasprostranjeniji, najutjecajniji, najkompliciraniji, najneophodniji i najskuplji tehnički sustav ikada izgrađen.

On je „najveći“ jer golemo postrojenja (elektrane) za proizvodnju električne energije, zajedno s prienosnim (dalekovodi, Slika 1-1, rasklopna postrojenja, Slika 1-2) i razdjelnim dijelom (razdjelne mreže, Slika 1-3, transformatorske stanice, Slika 1-4) elektroenergetskog sustava zauzimaju velika prostranstva Zemlje.

(U bivšem su SSSR-u političari isticali da se, kada se zbroje ploštine površina koje zauzimaju njihove elektrane, dobije ploština površina Belgije.)



Slika 1-1 Visokonaponski dalekovod



Slika 1-2 Rasklopno postrojenje



Slika 1-3 Razdjelna (distribucijska) mreža



Slika 1-4 Razdjelna (distribucijska) transformatorska stanica

Trenutačno najveća je elektrana na svijetu hidroelektrana „Itaipu“, Slika 1-5, koja proizvodi električnu energiju, 108 TWh godišnje ($T = 10^{12}$), transformirajući energiju vodotoka rijeke Parane, granične rijeke Paragvaja i Brazila, pete po veličini (količini vode) i trinaeste po duljini rijeke svijeta. (*Prosječna je godišnja proizvodnja nuklearne elektrane „Krk“ nešto više od 5 TWh godišnje.*)



Slika 1-5 Pogled na hidroelektranu „ITAIPU“, 14.000 MW
(Na lijevoj je strani preliv, a elektrana se nalazi u sredini.)

Godine 1973. vlade su Brazila i Paragvaja potpisale ugovor "o razvoju hidroelektričnih izvora na rijeci Parana", a 1974. godine osnovale "ITAIPU Binacional", kooperaciju s legalnim, administrativnim i financijskim kapacitetima i tehničkom odgovornošću za planiranje, izgradnju i rad elektrane. Izgradnja je započela 1975. godine, završena je 1991., no, 2005. godine ugrađena su još dva generatora tako da ih je sada ukupno dvadeset. Svaki je generator snage 700 MW. Svoj je vrhunac izgradnja dosegla 1978. sa 40.000 zaposlenih radnika. Mjesečna je potrošnja betona bila 338.000 m^3 , a ukupno je potrošeno $12.800.000 \text{ m}^3$ betona. Količina čelika i željeza ugrađenih u strukturu brane dostatna je za izgradnju 380 Eiffelovih tornjeva, a količina betona za izgradnju jednomilijunskog grada: ta je količina betona 15 puta veća od količine utrošene na izgradnju podvodnog tunela između Francuske i Engleske.

Brana se sastoji, Slika 1-6 i Slika 1-7, od niza različitih tipova brana ukupne duljine 7.744 metara s najvišom točkom od 225 m; srednja je visina brane 196 m. Akumulacijsko je jezero dugo 170 km i sadrži 29 milijardi tona vode.

(Najviša brana međutim, 300 m visoka, nalazi se na rijeci Vakhsh /Surkhab/, u Tadžikistanu, na kojoj je u izgradnji još viša brana: 335 m.)



Slika 1-6 Na vrhu 7,7 km duge brane

450.000 ljudi preseljeno je zbog gradnje hidroelektrane (zbog nastanka akumulacijskog jezera, Slika 1-8), a za potrebe radnika i njihovih obitelji izgrađeno je 9.500 kuća, nekoliko škola, 2 bolnice, bazeni, igrališta, parkovi, ...



Slika 1-7 Na dnu 196 m visoke brane: cijevi dovode vodu za 20 agregata

Snaga je hidroelektrane „Itaipu“ 14.000 MW ($14.000 \cdot 10^6$ W).

Kolika je ta snaga bit će jasnije spomenemo li da je snaga motora automobila srednje klase manja od 100 kW ($100 \cdot 10^3$ W), a snaga hrvatskog elektroenergetskog sustava, (suma snaga svih postrojenja za proizvodnju električne energije izgrađenih na području Republike Hrvatske, 2007. godina), 3.502 MW od čega u hidroelektranama 2.063 MW / 25 hidroelektrana/, a u termoelektranama 1.439 MW / 4 termoelektrane i 3 termoelektrane-toplane/. Hidroelektrane su većinom akumulacijskog tipa smještene pretežno u hrvatskom priobalju, te manjim dijelom protočne elektrane koje se uglavnom nalaze u sjeverozapadnom dijelu Hrvatske.

(Snaga je najveće hrvatske elektrane, hidroelektrane „Zakućac“ koja se nalazi na rijeci Cetini, 486 MW, dok je snaga najveće hrvatske termoelektrane, termoelektrane „Sisak“, 420 MW.)

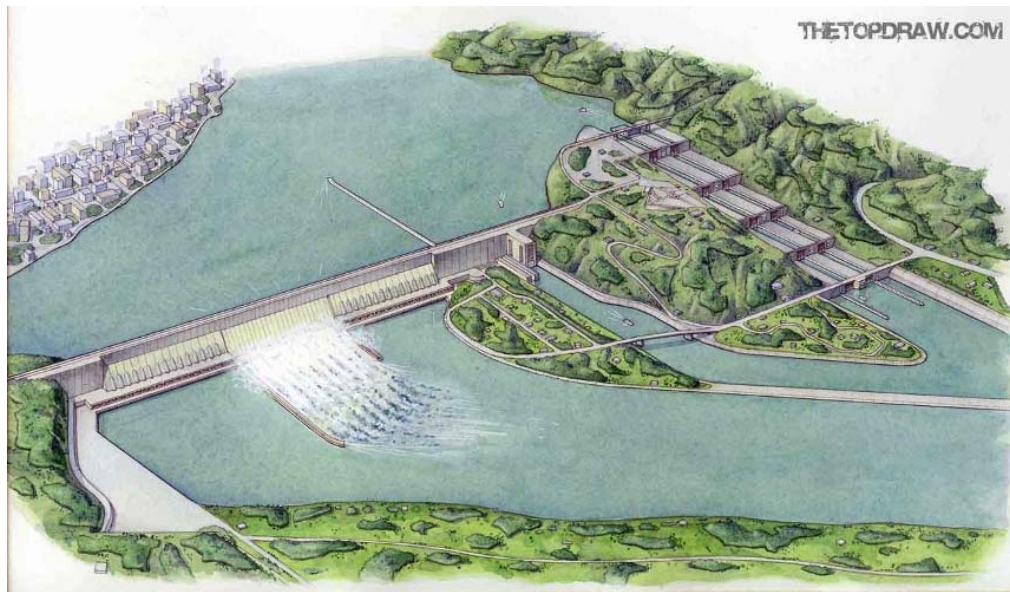
Većina je termoelektrana izvedena s pogonom na tekuća goriva (derivati nafte: loživo ulje i ekstra lako ulje), a manji broj je s pogonom na ugljen i prirodni plin. Tri termoelektrana uz električnu proizvode i toplinsku energiju kojom opskrbljuju toplinske potrošače u velikim gradovima.

Osim vlastitih izvora Hrvatska raspolaže i s elektranama izgrađenim u drugim državama. Temeljem udjela u izgradnji nuklearne elektrane „Krško“ u Sloveniji, za potrebe Hrvatske raspoloživa je polovica instalirane snage, 354 MW. Temeljem financiranja izgradnje termoelektrane „Obrenovac“ u Srbiji, Hrvatska ima ugovorno pravo korištenja njezinih 300 MW, a temeljem ulaganja u termoelektanu „Gacko“, snage 100 MW, u Bosni i Hercegovini, Hrvatska ima ugovorno pravo raspolaganja i s tom snagom. Ukupna je prema tome snaga postrojenja za proizvodnju električne energije kojima raspolaže Hrvatska 4.256 MW.



Slika 1-8 Akumulacijsko jezero nastalo izgradnjom brane zauzima površinu od 1.350 km², duljine je 170 km i prosječne širine 7 km

Međutim, u Kini se, na rijeci Jangce (Yangtze ili Chang Jiang), trećoj svjetskoj rijeci po duljini, gradi još veća hidroelektrana, hidroelektrana "Tri klisure", ili „Tri kanjona“, kako je mnogi zovu, Slika 1-9.



Slika 1-9 Hidroelektrana "Tri klisure", 22.500 MW

Hidroelektrana "Tri klisure" gradi se blizu grada Yichanga u provinciji Hubei. Njena će snaga biti 22.500 MW, a predviđena godišnja proizvodnja 100 TWh ($100 \cdot 10^{12}$ Wh; godišnja je proizvodnja NE Krško nešto veća od 5TWh) električne energije godišnje, što je oko 10% današnje ukupne kineske proizvodnje električne energije.

(Grada hidroelektrana "Tri klisure" drugi je najveći građevinski poduhvatu u povijesti čovječanstva dosad; prvi je "Veliki (kineski) zid".)

Hidroelektrana se gradi u više faza, a radovi su započeli 1993. godine. Brana je dovršena 2006. godine, dok su trenutačno, početak 2010. god., instalirana 26 generatora, svaki snage 700 MW, a do kraja 2011. god. ugradit će se još osam generatora: 6 snage 700MW i 2 snage 50MW svaki. Hidroelektrana će sadržavati 32 vodne turbine sumarne snage 22.500 MW.

Osim proizvodnje električne energije brana će sprječavati katastrofalne poplave rijeke Jangce koje su stoljećima odnosile na tisuće i tisuće ljudskih života godišnje.

Navedimo još nekoliko fascinantnih podataka o hidroelektrani "Tri klisure".

Projekt izgradnje brane:

- iskopano 102,6 milijuna m³ zemlje i kamenja;
- potrošeno betona: 26,43 milijuna m³;
- potrošeno čelika: 354.000 tona;
- visina brane: 185 metara;
- duljina brane: 2.335 metara, podijeljena u tri dijela. U sredini će biti preljevni dio dug 484 metara, s 23 cijevna ispusta i 22 zapornice. Lijevo i desno od preljeva bit će dvije velike strojarnice;

UVODNA RAZMATRANJA

- vrijeme gradnje:
- prva je faza radova započela 1994, a završila 1997. godine sa skretanjem rijeke Jangce iz njenog prirodnog vodotoka kako bi se mogla izgraditi brana akumulacijskog jezera, Slika 1-10 i Slika 1-11;
- druga faza započela je 1998, a završila 2003. godine kad je razina vode u rezervoaru dosegla 156 metara, a elektrana otpočela s proizvodnjom (prvih 6 agregata); do kraja 2006. godine 14 generatora proizvodilo je električnu energiju;
- treća bi faza trebala završiti 2011. godine kad će visina vode dosegnuti 175 metara, a elektrana raditi punim kapacitetom.
-



Slika 1-10 Radovi na brani



Slika 1-11 Pogled s brane

Posljedice izgradnje brane:

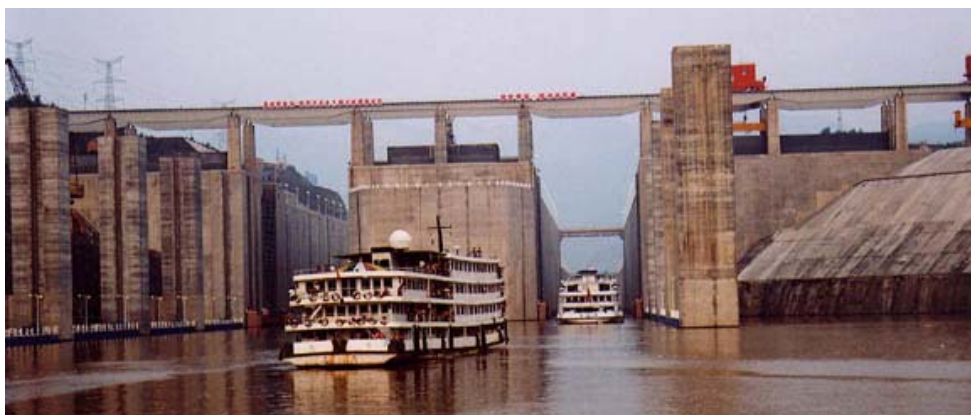
- onečišćenje će vode rijeke Jangce porasti najmanje dva puta jer je zbog brane potopljeno mnogo rudnika, tvornica i ljudskih naselja u kojima se nalazi oko 50 vrsta raznih tvari koje onečišćuju okoliš;
- oko 1.300 arheoloških nalazišta bit će preseljeno ili poplavljeno;
- kritičari ističu da će velike količine mulja u rijeci stvarati guste naslage uz krajeve brane otežavajući glavne tijekove rijeke prema gradu Chongqingu. (Chongqing je petnaestomilijunski grad do kojeg će brodovi ploviti 1.500 km uzvodno od mora i pritom biti podizani preko brane u akumulacijsko jezero: dizani 186 m uvis najsnažnijim dosad izgrađenim "vodenim dizalom", Slika 1-9 i 1-13.);
- poplavljeno je 632 km², 19 gradova, 326 sela, uključujući 27 000 hektara farmi i voćnjaka;
- bit će preseljeno između 1,1 i 1,9 milijuna ljudi;
- (Nabrojene su samo činjenične posljedice izgradnje brane; ukupne (moguće) posljedice koje predviđaju analize rizika spadaju u kategoriju katastrofa.)

Akumulacijsko jezero:

- prosječna širina: 1,1 kilometar;
- duljina: 600 kilometara;
- ploština površine jezera: 1045 km²
- volumen: 39,3 milijardi m³ vode;
- razina vode: 175 metara iznad razine vode rijeke Jangce;
- otjecanje: svake će godine 451 milijardi m³ vode iz rijeke Jangce utjecati u akumulacijsko jezero;
- mulj: muljeviti će Jangce u jezero nataložiti 530 milijuna tona mulja svake godine.

Plovidba:

- prevodnica se za brodove sastoji od pet ustava. Svaka je duga 280 metara i široka 35 metara s dubinom vode od 5 metara, Slika 1-12;
- plovidba je omogućena brodovima na dijelu rijeke od Šangaja (mora) do Chongqinga;
- ustave za dizanje brodova dižu brodove mase do 3 000 tona; Slika 1-13.
- predviđa se da će brodarenje preko tog dijela rijeke porasti s 10 milijuna na 50 milijuna tona godišnje, sa smanjenjem transportnih troškova od 30 do 37%.



Slika 1-12 Prva ustava



Slika 1-13 Podizanje brodova preko brane

Zaštita od poplava:

- pretpostavlja se da će 22,1 milijardi kubičnih metara kapaciteta rezervoara za kontrolu poplava smanjiti učestalost velikih nizvodnih poplava s jedne u 10 godina na jednu u 100 godina.

Na kraju, govoreći o dvije najveće hidroelektrane na svijetu, spomenimo i ovo: bez obzira na veličinu i snagu hidroelektrane „Tri klisure“, hidroelektrana „Itaipu“ je ipak, za sada, u najvažnijem segmentu – proizvodnji električne energije – nadmašuje. Razlog je stabilniji tok rijeke Parana od toka rijeke Jangce na onom dijelu gdje se gradi hidroelektrana „Tri klisure“. Uz to, vode se rijeke Parana reguliraju kroz veći broj hidroelektrana uzvodno od hidroelektrane „Itaipu“.

Najveća je svjetska nuklearna elektrana japanska nuklearna elektrana „Kashiwazaki Kariwa“ snage 8.212 MW, Slika 1-14. Sadrži 7 nuklearnih reaktora. (5 snage 1.067 MW i 2 snage 1.315 MW.)



Slika 1-14 Nuklearna elektrana „Kashiwazaki Kariwa“, 8.212 MW

Najveća je termoelektrana izgrađena na (u) Taiwanu, termoelektrana „Taichung“, Slika 1-15. Snage je 5.780 MW, a sadrži 10 agregata (agregatom nazivamo sklop pogonskog stroja, u ovom slučaju parne turbine, i sinkronog generatora). Dva agregata, svaki snage od 800 MW, planiraju se ugraditi u termoelektranu do 2016. godine.



Slika 1-15 Termoelektrana „Taichung“, 5.780 MW

Najveća geotermalna elektrana izgrađena je u Meksiku. Snage je 720 MW, a do 1012. godine bit će povećana do snage od 820 MW, Slika 1-16.



Slika 1-16 Geotermalna elektrana, 720 MW

Najveće postrojenje za indirektnu pretvorbu Sunčeve energije u električnu energiju nalazi se u kalifornijskoj pustinji Mojave: izgrađeno je dosad devet solarnih termoelektrana ukupne snage 354 MW, **Error! Reference source not found.**7.



Slika 1-167 Pet od devet solarnih termoelektrana u pustinji Mojave

(Dvije najveće među njima snage su 80 MW; one su trenutačno najveća (pojedinačna) postrojenja u kojima se Sunčeva energija pretvara u električnu energiju bez obzira na to radi li se o direktnoj ili indirektnoj pretvorbi.)

Krajem 2009. godine najveće pak postrojenje za direktnu pretvorbu Sunčeve energije u električnu energiju (solarna fotonaponska elektrana) postrojenje je izgrađeno 2008. godine u Španjolskoj. Postrojenje se koristi s više od 162.000 solarnih fotonaponskih panela sumarne snage (električne) 60MW, Slika 1-18.



Slika 1-18 Solarna fotonaponska elektrana snage 60 MW izgrađena u Španjolskoj

Najveći vjetroagregat danas ima dijametar rotora jednak 126 metara, Slika 1-179, službeno snage je 6 MW, no očekuje se da će njegova stvarna snaga biti veća od 7MW. Instaliran je u Njemačkoj.

(Uobičajeno vjetroelektrana sadrži više vjetroagregata. /Govori se i o „farmi vjetra“ radi le o više vjetroagregata smještenih na istoj lokaciji./ Vjetroagregatom nazivamo sklop vjetroturbine i generatora u kojem se mehanički rad pretvara u električnu energiju.)



Slika 1-179 Vjetroagregat snage 7+ MW

Elektroenergetski je sustav „najrasprostranjeniji“ tehnički sustav budući da je, povezujući države, pa i kontinente, još uvijek rasprostranjeniji od Interneta: električna energija, naime, stiže u više domova od Interneta.

10.X.2004. godine, nakon 13 godina, ponovno su povezivani elektroenergetski sustavi zapadne i jugoistočne Europe, razdvojeni zbog rata na područjima bivše SFR Jugoslavije, u europski elektroenergetski sustav, drugi po veličini EES u svijetu. (Bit će najveći kad se priključi i Rusija, što se dogovara i postupno ostvari.) Nakon objedinjavanja, naime, čitava je kontinentalna Europa postala jedinstveno sinkrono elektroenergetsko područje s 480 milijuna ljudi u 22 države i s godišnjom potrošnjom električne energije od približno 2.300 TWh. Povezivanje je obavljeno u dispečerskom centru Hrvatske elektroprivrede u Zagrebu čime je iskazano veliko uvažavanje hrvatskih elektroenergetskih stručnjaka; europske su države izrazile povjerenje u njihovo znanje tražeći da oni povežu države Europe u jedinstveni elektroenergetski sustav.

Spominjući da je „EES najutjecajniji tehnički sustav“ mislimo pritom na, nažalost, neželjene utjecaje na ljude i okoliš koji se, međutim, u znatnoj mjeri (gotovo u potpunosti) mogu otkloniti; doduše uz veliku potrošnju energije (eksergije) odnosno novca. Tako, primjerice, u termoelektrani, relativno male snage, 1.000 MW, izgara dnevno više od 8.000 tona najkvalitetnijeg ugljena (kamenog ugljena) omogućujući proizvodnju električne energije ali i opterećujući okoliš nusproduktima. Energetski su procesi pritom, pretvorbe kemijske energije (fosilnih) goriva u termoelektranama u električnu energiju, relativno komplicirani: odvija se neprekidno i istodobno nekoliko procesa transformacije oblika energije do konačnog oblika, električne energije. (Na ovom mjestu predstaviti ćemo kvalitativnu sliku njihovih odvijanja, kasnije bavit ćemo se njihovom kvantifikacijom.) Sve započinje procesom izgaranja: kemijska se energija, pohranjena u ugljenu, pretvara u unutrašnju kaloričku energiju produkata izgaranja. Primjerice, u „konvencionalnoj“ termoelektrani snage 1000 MW, koja radi 80% vremena u godini dana, izgorjet će godišnje oko 2.500.000 tona kamenog ugljena (najkvalitetniji ugljen), nastati više od 8.750.000 tona CO₂, više od 100.000 tona SO₂ (pritom se radi o kamenom ugljenu s vrlo malim postotkom sadržanog sumpora, ispod 1%) i više od 16.000 tona NO₂ koji se, u plinovitom stanju, oslobađaju u atmosferu, kao i više od 580.000 tona (krutog) pepela. Ugljik-dioksid (ugljični dioksid), CO₂, jedan je od uzročnika „efekta staklenika“, a sumporni i dušikovi oksidi vežu se s vodikom u sumpornu i dušičnu kiselinu izazivajući „kisele kiše“ odnosno uzrokujući kiselost tla. (Usporedbe radi spomenimo da termički fisijski reaktor nuklearne elektrane iste snage troši godišnje, uz iste uvjete, 30 tona nuklearnog goriva.)

Dakako, „prirodni“ efekt staklenika neophodan je za održanje života na Zemlji. Zašto? Bez tog bi efekta prosječna temperatura na Zemlji bila -19 °C. (Ovako, prosječna je temperatura ≈15 °C). Naime, u svijetu kojem živimo neprestano se odvija samo jedan te isti proces - strujanjem energije izjednačuje se početno nejednolika raspodjela gustoće energije: energija struji sa sustava (iz prostora) veće gustoće na sustav (u prostor) manje gustoće. Tako se energija Sunčeva zračenja pristigla na Zemlju stalno isijava u Svemir. Pritom vrijedi bilanca energije (princip očuvanja energije): količina dozračene energije jednaka je količini izračene energije u nekom vremenskom razdoblju, zanemarimo li dio te energije koja se pretvara u stacionarne (stalne) oblike energije. Budući da je vrijednost solarne konstante (vidjeti 2.2.2) 1,36 kW/m², da Zemlju, s obzirom na dozračenu Sunčevu energiju, možemo smatrati ravnim diskom površine $r_{Zemlje}^2 \cdot \pi$, da se 30% dozračene energije sa Sunca na vanjskom obodu atmosfere odmah reflektira u Svemir, te da Zemlja zrači prema Stefan-Boltzmannovom zakonu, to vrijedi:

$$P_{\text{apsorbinana}} = (1-0,3) \cdot 1,36 \text{ kW/m}^2 \cdot r_{\text{Zemlje}}^2 \cdot \pi = P_{\text{izračuna}} = 5,67 \cdot 10^8 \text{ W/m}^2 \text{K}^4 \cdot T^4 \cdot 4r_{\text{Zemlje}}^2 \cdot \pi,$$

pa dobivamo

$$T^4 = 0,7 \cdot 1,36 \text{ kW/m}^2 / 4 \cdot 5,67 \cdot 10^8 \text{ W/m}^2 \text{K}^4 = 4,17 \cdot 10^9 \text{ K}^4, \text{ odnosno, } T = 254 \text{ K} \\ (\approx -19^\circ \text{C}).$$

Kruti pepeo sadrži otrovne kovine, ali i radioaktivne elemente.

(Ironično ili ne, većina među nama ne zna da termoelektrana (pepeo) rači bitno više od nuklearne elektrane u normalnom pogonu / ispravnom, pogonu bez kvara/.)

Transformacije se pak energije nastavljaju dalje: unutrašnja se kalorička energija pohranjena u plinovitim produktima izgaranja ugljena (fosilnih goriva) pretvara u toplinsku energiju koja, kao prijelazni oblik energije, nevezan uz masu (tvar), prelazi na vodu i vodenu paru u parnom kotlu termoelektrane pretvarajući se ponovno u unutrašnju kaloričku energiju vode i vodene pare. U vodenoj pari što struji iz parnog kotla do turbine pohranjena je kinetička i potencijalna energija i oblik energije koji nazivamo entalpija.

(Entalpijom nazivamo sumu unutrašnje kaloričke energije i mehaničkog rada obavljenog na vodenoj pari kako bi vodena para iz parnog kotla strujala do parne turbine. Energija je, naime, skalarna veličina; podliježe zakonima algebre: različiti se oblici energije mogu zbrajati, odnosno oduzimati, dajući konačan, sumaran, ukupan iznos energije.)

Ti se oblici energije u statoru parne turbine (u nekim parnim turbinama dodatno i u rotoru) pretvaraju u kinetičku energiju pare koja zatim velikom brzinom struji kroz rotor parne turbine gdje se kinetička energija pare pretvara u mehaničku energiju rotora turbine a ova, posredstvom sile, u mehanički rad koji se dobiva na osovini rotora turbine i naziva tehničkim radom. Mehanički je rad, poput toplinske i električne energije, prijelazan oblik energije. Ne može se akumulirati, nastaje samo u trenutku kad sila djeluje na pomičnu granicu sustava. Bez posredstva fluida, odnosno djelatne tvari ili medija, prelazi, posredstvom sile, koja u ovom slučaju djeluje na osovinu parne turbine povezane s osovinom rotora sinkronog generatora, u sinkroni generator gdje obavlja rad odvajajući elektrone iz elektronskih omotača atoma transformirajući se tako u oblik energije koji nazivamo električnom energijom. Električna se energija zatim vodovima (dalekovodima), vodičima i kabelima usmjerava do uređaja u kojima se, po potrebi, pretvara u jedan ili više korisnih oblika energije. No, to još nije kompletan sumarni energetske proces. Kemijska je energija naime energija što znači da sadrži i (veliki) dio anergije, oblika energije koji se ne može pretvoriti niti u jedan drugi oblik pa, dakle, ni u električnu energiju (eksergiju). Jer je i anergija energija, a energija je neuništiva, nemamo kamo s njom nego vratiti je u (našu) okolicu: nešto manje od 2/3 energije ugljena (goriva), ovisno o ukupnom stupnju djelovanja termoelektrane (ovisno o „modernosti“ termoelektrane) odvodi se u okolicu termoelektrane (predaje se vodi, zraku, tlu) u obliku toplinske energije opterećujući toplinski (termički) okoliš: prijelazom u okolicu ta se toplinska energija pretvara u unutrašnju kaloričku energiju, pohranjuje u okolicu (podsustavima okolice: zraku, vodi i tlu) povisujući temperaturu (podsustava) okolice. (Nužno se mora raditi o toplinskoj energiji budući da je ona prijelazni oblik energije.)

(Tu količinu energije, koja je sva (teoretski) anergija (sadrži vrlo malo eksergije u što ćemo se uvjeriti), slabo upućeni nazivaju „gubitkom energije“ zgražavajući se „kako veliki gubitak energije proizvode termoelektrane“ zgražavajući nas „elektroenergetičare“, ne toliko svojim neznanjem, koliko hrabrošću (drskošću) da govore o stvarima koje niti poznaju niti razumiju.)

Na kraju, uz nužno ograđivanje, mi nismo provodili takve analize, spomenimo nalaze studija prema kojima svaka termoelektrana, koja se koristi fosilnim gorivom, svojim radom uzrokuje u prosjeku oko 75 (preranih) smrti ljudi godišnje.

„Elektroenergetski je sustav danas najneophodniji tehnički sustav?“ Nemate li proživljeno iskustvo sa „životom bez električne energije („modernog“) ljudskog bića“, pokušajte dočarati (svoj) dan bez električne energije. Predočite si posljedice prekida opskrbe električnom energijom u trenutku dok ste u dizalu nebodera, uspinjači na planini za vrijeme oluje, u podzemnoj željeznici stotinama metara ispod površine Zemlje, u zubarskom stolcu, na operacijskom stolu bolnice? Ili, mnogo bezazlenije, ali svejedno iritirajuće, za vrijeme prijenosa finalne utakmice Svjetskog nogometnog prvenstva ili kada „nestanak struje“ rezultira gubitkom dijela napisanog teksta i/ili obavljenog proračuna?

Konačno, prema dosad izrečenom, lako je razumjeti zašto je elektroenergetski sustav doista i „najkompliciraniji (najsloženiji)“ i „najskuplji“ tehnički sustav sa zadaćom opskrbljivanja eksergijom.

1.10 O potrošnji i proizvodnji električne energije

Svjetska će potrošnja električne energije, prema nekim predviđanjima, rasti brže od svih ostalih oblika energije: do 2030. udvostručit će se sa sadašnjih 16.500 TWh na približno 31.600 TWh. Istodobno, broj se stanovnika u svijetu povećava godišnje za 78 milijuna, od 1960. udvostručio se, a gotovo dvije milijarde ljudi nema pristup električnoj energiji. U 2030. godini 70% električne energije u svijetu proizvodit će se, prema procjenama, iz fosilnih goriva, očekuje se veći doprinos obnovljivih izvora energije, te zadržavanje udjela nuklearne energije u proizvodnji električne energije (17%). Predviđena se opskrba električnom energijom time, u odnosu na današnju, vrlo malo mijenja. Naime, od trenutačne sumarne snage svjetskih elektrana, koja je nešto veća od 3,5 TW, približno 66% otpada na termoelektrane u kojima izgara fosilno gorivo (ugljen pretežito), a preostalih 34 % dijele, praktički pola-pola (ovisno od godine do godine), hidro i nuklearne elektrane.

(Postotak je sudjelovanja ostalih postrojenja za proizvodnju električne energije (vjetroelektrana, solarnih elektrana, odnosno elektrana što pretvaraju energiju plime i oseke, morskih valova, biomase, geotermičke energije itd. u električnu energiju) u ovom trenutku toliko malen da se u statistikama ne navodi.)

Pritom, radi se (približno) o ovim odnosima energije, oslobođene izgaranjem (ili fisijom) 1 kg goriva, odnosno energije sadržane u 1 kg vode ili zraka, te transformirane u postrojenjima za proizvodnju električne energije (termoelektranama, nuklearnim elektranama, hidroelektranama i vjetroelektranama) u električnu energiju:

- 1 kg drva omogućuje proizvodnju 1 kWh električne energije,
- 1 kg ugljena 3 kWh električne energije,

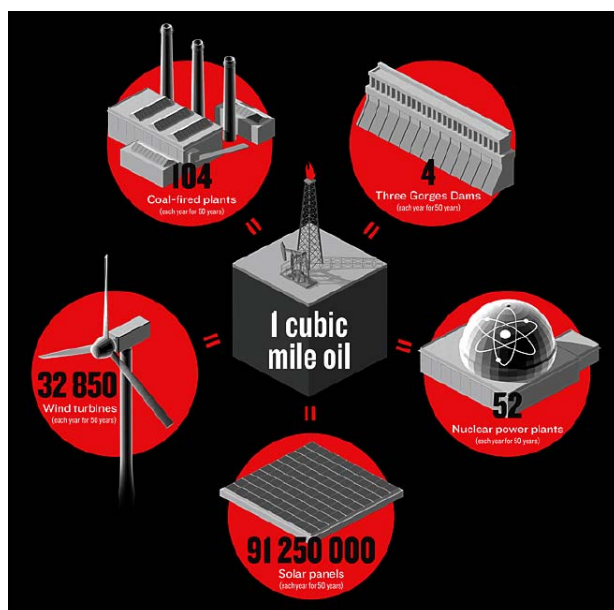
UVODNA RAZMATRANJA

- 1 kg nafte 4 kWh električne energije; (približno i 1 kg plina),
- 1 kg prirodnog uranija 50.000 kWh električne energije,
- 1 kg plutonija 6.000.000 kWh električne energije, dok se
- iz potencijalne energije 1 kg vode, smještene na visini h iznad hidroelektrane, odnosno kinetičke energije 1 kg zraka, brzine c , dobiva, u idealnom slučaju, $2,778 \cdot 10^{-7} \cdot g \cdot h$ kWh odnosno $2,778 \cdot 10^{-7} \cdot c^2 / 2$ kWh.

Očito, mala je gustoća energije pohranjena u vodi i zraku, pa su zbog toga potrebne goleme količine vode i velike dubine akumulacijskih jezera (poput akumulacijskih jezera hidroelektrana „Itaipu“ i „Tri klisure“) ili velike visine s kojih pada voda (h [m]), odnosno goleme količine i velike brzine (c [m/s]) zraka (vjetra). *(Velike su brzine vjetra međutim neiskoristive zbog prevelikih snaga koje ne mogu izdržati vjetroeletktrane; snaga vjetra naime raste s trećom potencijom brzine.)*

Pritom se, dakako, u elektranama (hidroelektranama odnosno vjetroeletktranama) ne može iskoristiti sva energija vode ili zraka jer i voda i zrak moraju dalje strujati (odnositi neiskorištenu, netransformiranu energiju) da bi načinili mjesta količinama koje dolaze; radi se, naime, o strujanju fluida.

Upozorimo na kraju ovog razmatranja, kao ilustraciju lakoće pogrešnog zaključivanja, na pokušaj slikovitog (i jednostavnog) prikaza odnosa zadovoljenja svjetskih potreba za energijom, pomoću različitih postrojenja, objavljen u časopisu IEEE Spectrum u siječnju 2007. Računalo se da Svijet u tom trenutku troši energiju jednaku energiji oslobođenoj izgaranjem jedne kubične milje nafte (KMN), pa je ta energija ($1 \text{ KMN} = 4.168.181.825 \text{ m}^3 \approx 4,2 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ osigurava $1,6 \cdot 10^{20} \text{ J}$ toplinske energije) prikazana pomoću istog iznosa električne energije proizvedene (izdvojeno) u hidroelektranama, termoelektranama, nuklearnim elektranama, vjetroeletktranama i solarnim panelima, Slika 1-20, čiji je broj određen uz traženje da neprekidno rade 50 godina te da su ovih veličina:



Slika 1-20 Jedna kubična milja nafte – odnos s postrojenjima za proizvodnju električne energije

- brana hidroelektrane „Tri klisure“ (the Three Gorges Dam) predstavlja postrojenje za proizvodnju električne energije (hidroelektranu) snage (električne) $18 \cdot 10^9 \text{W}$,
- nuklearna elektrana snage je (električne) $1,1 \cdot 10^9 \text{W}$,
- termoelektrana $500 \cdot 10^6 \text{W}$,
- vjetroelektrana $1,65 \cdot 10^6 \text{W}$, a
- solarni panel $2,1 \cdot 10^3 \text{W}$.

Oprostimo li „manje“ pogreške koje se provlače kroz ovakvu usporedbu, „osnovna“ je pogreška nepremostiva - miješanje „krušaka i jabuka“: pogrešno (nedopustivo) izjednačavanje toplinske i električne energije

1.11 O nuklearnoj energiji fisije

Otkuda tolika razlika u količini električne energije dobivene transformacijom nuklearne energije sadržane u 1 kg prirodnog uranija odnosno 1 kg plutonija?

Prema današnjem stanju tehnike i tehnologije jedino je nuklearno gorivo, koje se u svom prirodnom obliku može neposredno upotrijebiti, izotop uranija U-235. No budući da njega u „prirodnom uraniju“ ima samo 0,712 %, dugoročni se razvoj iskorištavanja nuklearne energije temelji na tzv. „umjetnim nuklearnim gorivima“: plutoniju (Pu-239) i izotopu uranija U-233.

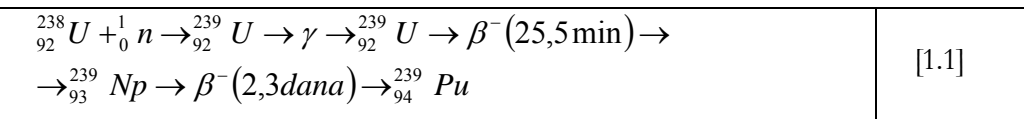
(Još dva umjetna kemijska elementa, americij i kalifornij, posjeduju svojstva „umjetnog nuklearnog goriva“, no ne spominju se jer se ne iskorištavaju u elektroenergetici.)

Prirodnim uranijem nazivamo smjesu uranijevih izotopa kojih je ukupan broj 15. Dva su pritom izotopa toliko zastupljena u toj smjesi da se ostali niti ne uračunavaju: uranij U-238, koji je glavni sastojak prirodnog uranija, ima ga 99,282% i uranij U-235, 0,712%.

Plutonij se dobiva od U-238. Ako se naime U-238 zrači („bombardira“) neutronima, jezgra U-238, koja je prihvatila neutron, postaje U-239 jer se za jedan neutron povećao broj nukleona.

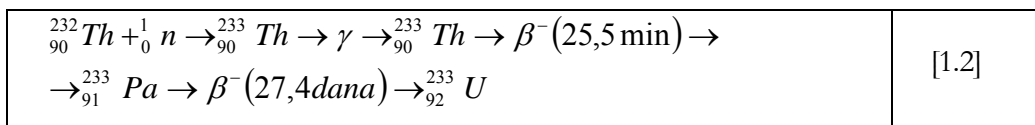
(Broj je nukleona jednak zbroju neutrona i protona, koji se zajedničkim imenom nazivaju nukleonima.)

U-239 emitira γ -zrake, a nakon emisije elektrona (β^- - zračenje /raspad/) iz jezgre povećava se broj protona uz nepromijenjeni broj nukleona jer je jedan neutron gubitkom naboja (elektrona) postao proton. Nakon emisije elektrona nastaje neptunij (Np-239) koji emisijom elektrona prelazi u plutonij (Pu-239):



(Plutonij ima 94 protona no svejedno je (praktički) stabilan jer mu je vrijeme poluraspada 24.000 godina.)

Izotop uranija U-233 dobiva se na isti način, ali od torija (Th-232). Th-232 nakon prihvata neutrona postaje Th-233 a ovaj, β^- - zračenjem, protaktinij (Pa-233). Protaktinij idućim β^- - zračenjem prelazi u U-233:



(U-233 ima 92 protona i vrijeme poluraspada 160.000 godina.)

Treba naglasiti da je za dobivanje umjetnih nuklearnih goriva potrebna izgradnja nuklearnih reaktora na bazi U-235 u kojima se, osim pretvorbe nuklearne u unutrašnju kaloričku energiju, proizvode i umjetna nuklearna goriva.

Pretvorbu je nuklearne u unutrašnju kaloričku energije moguće ostvariti pomoću većeg broja različitih procesa. Npr., raspadom litija djelovanjem neutrona: litij se nakon pretvorbe u berilij raspada na dva helijeva atoma. Pritom se, pri raspadu svake jezgre litija, dio mase (što se naziva „defektom mase“) transformira u unutrašnju kaloričku energiju ($E = \delta m \cdot c_{\text{svjetlosti}}^2$) te se dobiva oko 17 MeV energije.

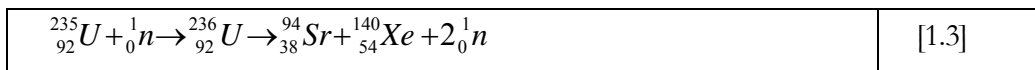
Defekt mase razlika je između mase atoma i sume masa njezinih konstituenata:

$$\delta m = [Z(m_p + m_e) + (A - Z)m_n] - m_{\text{atoma}}.$$

Z je broj protona i elektrona promatranog atoma, a A broj nukleona.

(**1eV / elektronvolt**/ definira se kao kinetička energija elektrona koju on dobije prošavši kroz električno polje razlike potencijala od 1V: **1eV = 1,6021•10⁻¹⁹As•1V = 1,6021•10⁻¹⁹J**.)

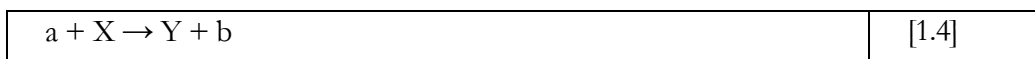
Takva je nuklearna reakcija međutim tehnički beskorisna, kao uostalom i većina nuklearnih procesa, jer se ne može sama po sebi dalje nastaviti. Za tehničke svrhe, naime, zanimljivi su samo oni nuklearni procesi, koji se, jedanput započeti vanjskim djelovanjem, mogu sami po sebi dalje nastaviti. Prikažimo jedan od takvih procesa:



(Početno je stanje na lijevoj, a konačno na desnoj strani.)

Preuzimanjem neutrona (n) u jezgru U-235 nastaje prijelazna jezgra U-236, koja se raspada u stroncij (Sr-94) i ksenon (Xe-140) uz istodobno oslobađanje dva neutrona pomoću kojih je moguće izazvati raspad drugih jezgara U-235. Vremenski interval između prodora neutrona u jezgru i fisije iznosi oko 10⁻¹⁵s.

Treba naglasiti da je moguć veći broj (stotinjak) načina raspada prijelazne jezgre U-236, pa se oslobađaju i tri neutrona. U proračunima se stoga uzima da se pri raspadu U-235 (prijelazne jezgre U-236) oslobađa u prosjeku 2,5 neutrona. Pri raspadu se najveći dio nuklearne energije transformira u unutrašnju kaloričku energiju produkata raspada. Općenito, nuklearnu reakciju možemo napisati u obliku



gdje slovo *a* označuje česticu koja izaziva reakciju u jezgri X. Jezgra X reakcijom prelazi u jezgru Y uz emisiju čestice *b*. Analitički je oblik principa očuvanja energije u reakciji pritom:

$m_a c_{\text{sv}}^2 + M_X c_{\text{sv}}^2 + E_{\text{kp}} = m_b c_{\text{sv}}^2 + M_Y c_{\text{sv}}^2 + E_{\text{kk}}$	[1.5]
---	-------

gdje su M_x , M_y , m_a i m_b mase jezgara i čestica, E_{kp} i E_{kk} početna i konačna kinetička energija, a c_{sv} brzina svjetlosti. Ako je razlika između konačne i početne kinetičke energije pozitivna, reakcije su „egzoergične“, tj. u njima se oslobađa energija. Princip očuvanja energije pokazuje da se u takvim reakcijama dio mase pretvara u energiju (izraz u uglatoj zagradi defekt je mase):

$E_{kk} - E_{kp} = [(M_x + m_a) - (M_y + m_b)]c_{sv}^2$	[1.6]
---	-------

Egzoergične nuklearne reakcije osnovni su izvori energije Sunca i zvijezda. U nuklearnim procesima ekvivalencija mase i energije ($E = \delta m \cdot c_{sv}^2$) pokazuje se mnogo očitije nego li pri procesima u kojima se mijenja samo raspored elektrona oko atomskih jezgara (u procesima izgaranja); mase su, naime, atomskih jezgara manje blizu jedan posto od zbroja masa protona i neutrona jer se u procesu spajanja nukleona u jezgru oslobađa energija koja prelazi u okolicu. Pritom, osim principa očuvanja poznatih u ostalim područjima fizike, postoje i specifični principi očuvanja u nuklearnim transformacijama. Ti se principi ne manifestiraju u makroskopskim i atomskim procesima u kojima se ne mijenjaju jezgre atoma. (Ne može se izmjeriti defekt mase.) U reakcijama pak u atomskim jezgrama ti dodatni principi očuvanja ovise o razini promjena u jezgri. Ako se pri nuklearnim reakcijama ne zbivaju promjene osnovnih sastojaka jezgre, protona i neutrona, djeluju i

- princip očuvanja električnog naboja i
- princip očuvanja ukupnog broja nukleona.

Zbivaju li se promjene i samih konstituenata jezgre, procesima beta-raspada, kojima proton može preći u neutron ili neutron u proton (β^+ - zračenje /raspad/) djeluje i

- princip očuvanja lakih čestica (elektrona, pozitrona ili neutrina).

Posljedica je djelovanja tih dodatnih principa da se odgovarajućim potroškom energije može proizvesti par elektron-pozitron, ali ne samo jedna od tih čestica. Pozitron je antičestica elektrona, pa stvaranjem para ni ukupan broj lakih čestica, niti ukupan naboja nije promijenjen.

(Spomenimo još da u reakcijama na vrlo visokim energijama u kojima nastaju i nove čestice srednje mase (mežoni), odnosno čestice mase jednake ili slične masi nukleona, djeluju i drugi principi očuvanja. Oni, međutim, ne utječu neposredno na (niskoenergetske) nuklearne reakcije važne u elektroenergetici, pa ih ne ćemo razmatrati.)

Budući da se raspadom jedne jezgre U-235 oslobađa više neutrona nego što je potrebno da bi se izazvao raspad iduće, naglo će se povećati broj raspadnutih jezgara jer je vremenski razmak između dva sukcesivna raspada 0,001s. Prema tome ne samo da se takva nuklearna reakcija jednom započeta može sama po sebi održavati, već se može razvijati kao lavina (eksplozija): ta je pojava upotrijebljena za izradu nuklearne („atomske“) bombe.

(Pritom, međutim, da bi se ostvarila „nuklearna eksplozija“, nužno je raspolagati s nuklearnim gorivom u kojem je postotak zastupljenosti U-235 najmanje 93,5% (u prirodnom uraniju zastupljenost je U-235 samo 0,712%), a postupak povećavanja količine U-235 u smjesi U-235 i U-238 nije jednostavan i zahtijeva znatan potrošak energije; drugim riječima, izrada nuklearne bombe, koja će se koristiti bilo U-235 ili Pu-239, zahtijeva veliki tehnološki i energetski angažman.)

Postigne li se pak da se reakcija odvija uz konstantan broj neutrona, dobiva se „lančana reakcija“ koja omogućuje tehničko iskorištavanje raspada jezgre U-235: transformaciju nuklearne energije fisije (cijepanja, za razliku od nuklearne energije fuzije – stapanja, udruživanja lakih atomskih jezgara u težu pri čemu se oslobađaju velike količine unutrašnje kaloričke energije na račun defekta mase) u električnu energiju. Lančana se reakcija može održavati zbog toga što je jezgra U-235 toliko labilna da se raspada, pošto

prihvati neutron, i bez dovođenja vanjske energije, odnosno i onda kad neutron ima minimalnu kinetičku energiju (tzv. „spori neutron“).

(Upravo to iznimno važno svojstvo, raspad pod djelovanjem sporih neutrona, omogućuje kontroliranje i upravljanje lančanom reakcijom u procesu proizvodnje električne energije, poglavlje 10.)

Nasuprot tome, npr., za raspad U-238 potrebna je znatna vanjska energija (velika kinetička energija neutrona, velika brzina neutrona), a za raspad jezgara lakih atoma potrebna energija iznosi i više stotina MeV. Prema tome tehnička važnost raspada jezgre U-235 nije samo u mogućnosti transformacije nuklearne u unutrašnju kaloričku energiju, što se postiže i drugim tipovima nuklearnih reakcija, već u tome što se može osigurati lančana reakcija; samoodrživo cijepanje jezgara atoma U-235 pomoću neutrona malih brzina (malih energija).

(Prema rečenome, kao U-235 (prirodno nuklearno gorivo) vladaju se još samo U-233 i Pu-239 (umjetna nuklearna goriva), pa su to jedine jezgre pomoću kojih se može osigurati lančana reakcija odnosno pretvorba nuklearne energije fisije u konačnosti u električnu energiju. /Američijem i kalifornijem, ponovimo, provediva je također lančana reakcija, no oni se ne ubrajaju / ne koriste se/ u umjetna nuklearna goriva.)

Kad je omjer kvadrata broja protona i broja nukleona (zbroj protona i neutrona) veći od 45, takve se jezgre spontano raspadaju, dakle, bez dovođenja energije. Za U-235 taj omjer iznosi 36 ($92^2/235$), pa spontani raspad (normalno) još nije moguć već se za raspad mora dovesti energija pomoću neutrona.

(Zašto, objasniti ćemo kasnije. Spominjemo „normalno“ budući da vrijedi statistička zakonitost jer se pojavljuju pojedinačni raspad U-235 i bez dovođenja energije izvana.)

Dovedena energija neutronom, potrebna za raspad jezgre, zove se „**energija aktiviranja**“. Za U-235 ona iznosi 6,8 MeV, a za U-238 7,1 MeV. No, energija je sporog neutrona 0,025 eV, pa ona ne bi bila dostatna da izazove raspad jezgre U-235. Usprkos tome, jezgra se U-235 raspada. Zašto? Treba uzeti u obzir da masa neutrona posjeduje i „**energiju mirovanja**“, mc_{sv}^2 , pa se postavlja pitanje je li prirast energije prijelazne jezgre U-236 u usporedbi s jezgrom U-235 dostatan da osigura raspad. Usporedbom mase U-235 i mase neutrona s jedne strane i mase U-236 s druge strane, dolazimo do zaključka da razlika iznosi 1,00168 jedinica mase (j.m. – relativna atomska masa, 1 j.m. = 1/12 mase najlakšeg izotopa atoma ugljika $^{12}_6C$, poglavlje 4.1.). Ako se izračuna razlika između mase neutrona (1,00898 j.m.) i navedene razlike, dolazi se do defekta mase (manjka mase) koji iznosi 0,00730 j.m. Budući da 1 jedinica mase odgovara energiji od (približno) 931 MeV, zaključujemo da se u procesu dovođenja neutrona u jezgu U-235 oslobađa energija od $0,00730 \cdot 931 \text{ MeV} = 6,8 \text{ MeV}$. Prema tome oslobođena je energija upravo dostatna za raspad jezgre U-236, pa se dakle U-235 može raspasti djelovanjem sporih neutrona.

Odnos se jedinice mase kao energije i elektronvolta dobiva iz sljedećeg razmatranja. Jedinica mase iznosi $\approx 1,661 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$, pa će za toliku masu energija mirovanja (mc_{sv}^2) biti :

$$1,661 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot (2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 = 14,924 \cdot 10^{-11} \text{ J}.$$

Kako je energija od jednog elektronvolta jednaka $1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ izlazi da je

$\text{Jedna jedinica mase} = \frac{14,924 \cdot 10^{-11}}{1,6021 \cdot 10^{-19}} \text{ eV} \approx 9,31 \cdot 10^8 \text{ eV} = 931 \text{ MeV}$	[1.7]
--	-------

Ako se analogni račun provede za U-238, dobiva se da oslobođena energija, kao posljedica defekta mase, iznosi 5,3 MeV, što je znatno manje od potrebne energije aktiviranja (7,1 MeV). Zaključuje se da raspad U-238 djelovanjem sporih neutrona nije moguć. Dovedeni neutron mora razliku energije $7,1 - 5,3 = 1,8$ MeV donijeti u obliku kinetičke energije. To drugim riječima znači da se raspad U-238 može ostvariti samo pomoću brzih neutrona (neutronske velike energije). Odnos između brzine (c_n) i energije (W_n) neutrona u elektronvoltima dobiva se na osnovi mase neutrona, koja iznosi $1,675 \cdot 10^{-27}$ kg, i relacije da 1eV predstavlja energiju od $1,6022 \cdot 10^{-19}$ J. Ako kinetičku energiju neutrona prikazemo relacijom

$W_n = \frac{m \cdot c_n^2}{2}$	[1.8]
---------------------------------	-------

izlazi da je

$c_n = 1,4 \cdot 10^4 \sqrt{W_n} \left[\frac{m}{s} \right]$	[1.9]
--	-------

S obzirom na mogućnost raspada za jezgre Pu-239 i U-233 dolazi se do istih zaključaka koji vrijede za U-235.

Raspadom jezgre U-235, prema razmatranoj relaciji, nastaje jezgra stroncija (Sr) i ksenona (Xe) te dva neutrona. Masa U-236 iznosi 236,127 j.m., a zbroj mase stroncija (93,938 j.m.), ksenona (139,955 j.m.) te mase dvaju neutrona ($2 \cdot 1,00898 = 2,01796$ j.m.), iznosi 235,91096 j.m. Raspadom se stoga U-236 pojavljuje defekt mase od $236,127 - 235,91096 = 0,21604$ j.m., što odgovara energiji od $931 \cdot 0,216 \approx 202$ MeV. Ta se energija pojavljuje većinom (oko 80%) kao unutrašnja kalorička energija (kinetička energija) produkata raspada (u promatranom slučaju stroncija i ksenona), zatim kao kinetička energija neutrona, a ostatak čine β – zračenje i γ – zračenje. Točnija je raspodjela energije dana u Tablici 1.1.

Tablica 1.1. Raspodjela energije fisije (raspada) jezgre U-235

	Generirana energija MeV	Iskoristiva energija MeV
fisijski fragmenti	168	168
raspad fisijskih produkata		
β -zrake	8	8
γ -zrake	7	7
neutrina	12	-
promptne γ -zrake	7	7
kinetička energija fisijskih neutrona	5	5
sekundarne γ -zrake	-	3
Ukupno	207	198

Međutim, istaknimo, količina je transformirane nuklearne energije u unutrašnju kaloričku energiju samo mali dio energije nuklearnog goriva. Ako naime uzmemo u obzir da jezgra U-235 ima masu od 235 j.m., a u energiju se transformira samo 0,216 j.m., to znači da je energetska iskoristivost samo (približno) 0,1 % ukupne mase koja sudjeluje u nuklearnoj reakciji. S takvim se stanjem međutim moramo zadovoljiti jer za tehničko iskorištenje ne postoji (ne poznajemo) bolji proces pretvorbe nuklearne energije, odnosno bilo kojeg oblika energije u druge energetske oblike, u korisne oblike energije.

(Najbolji je ljudskom biću (teoretski samo zasad) poznat proces proces termonuklearne fuzije koji se odvija na Suncu: u tom se procesu 0,75 % mase pretvara u unutrašnju kaloričku energiju.)

Promatrano makroskopski energija oslobođena nuklearnom fisijom nije mala količina energije. U masi 1g U-235 ima, pokazat ćemo, $6,022 \cdot 10^{23} / 235$ jezgara, a raspadom svake od njih dobiva se oko 200 MeV, što odgovara $320 \cdot 10^{-13}$ J, jer je $1 \text{ MeV} = 1,6022 \cdot 10^{-13} \text{ MJ}$. Prema tome raspadom se 1g U-235 dobiva energija

$$\frac{1}{235} \cdot 6,022 \cdot 10^{23} \cdot 320 \cdot 10^{-13} \text{ J} = 0,82 \cdot 10^{11} \text{ J}, \text{ odnosno}$$

$$\frac{0,82 \cdot 10^{11}}{3,6 \cdot 10^6} = 2,3 \cdot 10^4 \text{ kWh} = 23 \text{ MWh}$$

dok bi se pretvorbom cjelokupne mase 1g U-235 dobilo oko 23 GWh. ($1 \text{ M} = 10^6$, $1 \text{ G} = 10^9$)

(Raspadom jedne jezgre U-235 oslobađa se $0,89 \cdot 10^{17} \text{ kWh}$ jer se jednim raspadom dobiva $3,20 \cdot 10^{11} \text{ Ws}$, a $1 \text{ Ws} = 3,6 \cdot 10^{-6} \text{ kWh}$. Da bi se nuklearna energija transformirala u 1 kWh unutrašnje kaloričke energije, potreban je raspad $1,12 \cdot 10^{17}$ jezgara U-235.)

Oba elementa, prirodni uranij i torij, nisu rijetki u Zemljinoj kori. Prosječni udio uranija iznosi 4 g/t, a torija 10 do 15 g/t.

(U stijenama uranija ima od nekoliko miligrama do nekoliko stotina grama po toni, a u morskoj vodi oko tri miligrama po toni.)

Plutonij se ne nalazi u prirodi (iznimno i samo u veoma malim količinama unutar uranijeve rudače), već se proizvodi u nuklearnim reaktorima od U-238 prema relaciji [1.1]. Radi se pritom o dvjema vrstama reaktora: „termičkim reaktorima“ u kojima se smanjuje brzina (energija) neutrona kako bi se povećala vjerojatnost pogodaka jezgara U-235, ili reaktorima s brzim neutronima (tzv. „oplodnim reaktorima“), reaktorima u kojima se ne smanjuje brzina (energija) neutrona. U termičkim reaktorima samo neusporeni neutroni, pogode li jezgru U-238, osiguravaju proizvodnju plutonija, dok u oplodnim reaktorima svaki neutron, koji pogodi jezgru U-238, izaziva proizvodnju plutonija jer se radi o brzim neutronima. Kako takvi reaktori rade s „obogaćenim uranijem“ (u prirodnom je uraniju kompliciranim i skupim (energetski gledano) postupcima povećan postotak U-235 u odnosu na U-238) to se na završetku lančane reakcije, koja se odvija s U-235, ili, još povoljnije, s Pu-239, dobije više nuklearnog goriva (Pu-239) nego što je bilo na početku (jer se pritom iz U-238 dobiva Pu-239). Zbog toga se takvi reaktori nazivaju i „brzim, oplodnim reaktorima“.

(Uranij mora biti obogaćen, mora biti povećan broj jezgara U-235, ili Pu-239, u odnosu na broj jezgara U-238, kako bi se povećala vjerojatnost fisije (raspada jezgara U-235 ili Pu-239) koja je smanjena jer se sada lančana reakcija odvija održavana ne sporim već brzim neutronima.)

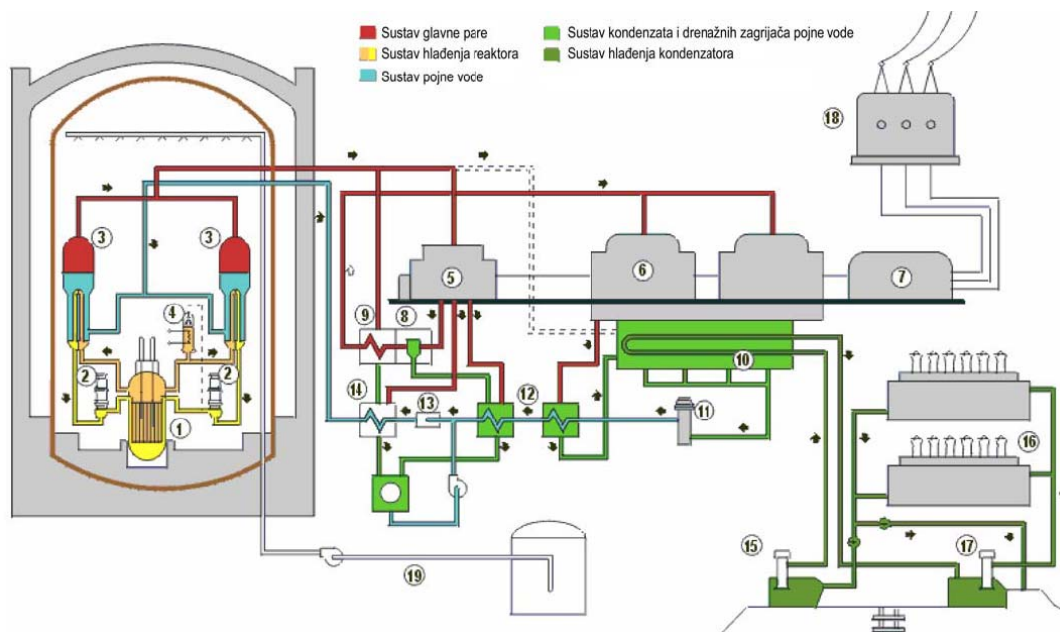
Tijekom nastajanja u termičkim reaktorima gotovo se polovica proizvedenog plutonija raspada fisijom, pa se s porastom izgaranja goriva energetske doprinos plutonija ne razlikuje mnogo od energetske prinosa U-235.

Netoproizvodnja plutonija ovisi o tipu termičkog reaktora. Tako u „lakovodnom reaktoru s vodom pod tlakom“ ili, kako se još naziva, „tlakovodnom reaktoru“, u kojem se „obična“ voda upotrebljava i kao „rashladno sredstvo“ i kao „moderator“, tj. „sredstvo za usporavanje neutrona“ (smanjivanje energije neutrona), električne snage 1.000 MW, koji radi godinu dana s nazivnom snagom, nastaje oko 710 kg „fisibilnog“ plutonija, od čega se u reaktoru raspadne 440 kg, pa u ozračenom gorivu ostaje oko 270 kg, što je jednako netoproizvodnji plutonija. U „teškovodnom reaktoru“, reaktoru u kojem se „teška voda“ upotrebljava i kao rashladno sredstvo i kao moderator, tipa „CANDU“, uz jednake pretpostavke, netoproizvodnja iznosi skoro 500 kg fisibilnog plutonija, a u reaktoru hlađenom ugljik-dioksidom više od 600 kg.

Lakovodni reaktor s vodom pod tlakom, Slika 1-218, reaktor je u kojemu (obična) voda usporava („moderira“) neutrone i ujedno pohranjuje i prenosi unutrašnju kaloričku energiju nastalu transformacijom iz nuklearne energije fisije.

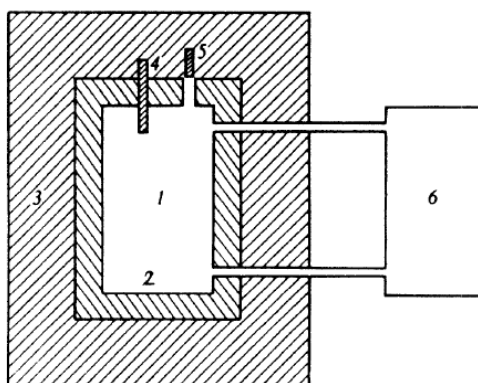
(Neutroni nastali raspadom jezgre U-235 i Pu-239 brži su neutroni koje valja usporiti; u protivnom ne bi se uopće mogla održavati lančana reakcija.)

Unutrašnja kalorička energija, nastala transformacijom nuklearne energije, pohranjuje se u nuklearnom gorivu i u produktima raspada, pretvara zatim u toplinsku energiju koja prelazi na vodu što struji kroz nuklearni reaktor (1). S trenutkom prijelaza ta se toplinska energija pretvara u unutrašnju kaloričku energiju vode. Zbog velikih je količina pohranjene unutrašnje kaloričke energije temperatura vode visoka: preko 300 °C na izlazu iz nuklearnog reaktora. Ta voda, tako su zamišljeni i tako se provode energetske procesi transformacije u električnu energiju u promatranoj nuklearnoj elektrani, ne smije isparivati. To je izvedivo jedino ako se voda nalazi pod velikim tlakom; otuda i naziv reaktora: „**reaktor s vodom pod tlakom**“ (ili, kraće „**tlakovodni reaktor**“) Zbog toga su potrebna dva odvojena (zatvorena) kruga: „primarni“ i „sekundarni“. Kroz prvi krug, primarni krug, voda pod tlakom tjerana pumpama (crpkama) (2) kruži kroz nuklearni reaktor (1) i izmjenjivače toplinske energije („generatore pare“ ili „parogeneratore“), (3). *(Pumpama se, utroškom energije (električne), održava visoki tlak u primarnom krugu: tlak veći od 150 bara.)* Unutrašnja se kalorička energija (točnije, entalpija) te vode u generatorima pare pretvara u toplinsku energiju koja prelazi na vodu u sekundarnom krugu nuklearne elektrane pretvarajući se u unutrašnju kaloričku energiju. Zbog toga raste temperatura vode te se ta voda, jer se u sekundarnom krugu nalazi pod bitno nižim tlakom (60-ak bara) od vode u primarnom krugu, pretvara u paru. Para struji kroz (parnu) turbinu, visoko (5) i niskotlačni dio (6) turbine, u kojoj se unutrašnja kalorička energija pare (točnije, entalpija pare) pretvara u mehanički rad, zatim kroz „kondenzator“ (10) u kojem se kondenzira (ukapluje) da bi pumpom (11) bila vraćena u generatore pare. (Pumpom (crpkom) se povisuje tlak vode s niskog tlaka u kondenzatoru na mnogostruko viši tlak u generatorima pare.) Mehanički se rad konačno, u sinkronom generatoru nuklearne elektrane (7), pretvara u električnu energiju.)



Slika 1-218 Funkcionalna shema nuklearne elektrane s reaktorom hlađenim i moderiranim običnom vodom pod tlakom: 1-(nuklearni) reaktor, 2-crpke (pumpe) primarnog rashladnog kruga, 3-parogeneratori, 4-tlačnik, 5-visoko tlačni dio turbine, 6-nisko- tlačni dio turbine, 7-sinkroni generator, 10-kondenzator, 11 kondenzatna pumpa (sekundarni rashladni krug), 16-rashladni tornjevi

Uređaj u kojem su ostvareni uvjeti održavanja lančane reakcije nazvan je „nuklearnim reaktorom“, Slika 1-22. U njegovoj je jezgri smješteno nuklearno gorivo i materijal za usporavanje neutrona (moderator). Kroz jezgru struji sredstvo kojim se odvodi toplinska energija korisniku. (U slučaju nuklearne elektrane, to je parogenerator odnosno sekundarni krug.) Da bi se spriječio „bijeg“ neutrona iz jezgre, ona je oklopljena reflektorom, a da bi se onemogućio prodor radioaktivnog zračenja u okoliš, oko reflektora je izgrađen biološki štit. Za regulaciju lančane reakcije služi kontrolni (regulacijski) sustav za koji se upotrebljavaju šipke od materijala (bor, kadmij) koji apsorbira („guta“) neutrone, pa tako oni ne mogu izazvati daljnje raspade jezgara U-235, a rezerva je sigurnosni sustav od istovrsnih šipki.



Slika 1-22 Shematski prikaz nuklearnog reaktora: 1 – jezgra reaktora, 2 – reflektor, 3 – sigurnosni (biološki) štit, 4 – kontrolni sustav, 5 – sigurnosni sustav, 6 – korisnik toplinske energije

Sedamdesetih se godina prošlog stoljeća predlagalo da se ne „prerađuje“ „ozračeno /istrošeno/ gorivo“ (to je gorivo u kojem je U-235 (i Pu-239) potrošen do postotka koji onemogućuje nastavljanje lančane reakcije) nego da se takvo gorivo, nakon vađenja iz jezgre, ostavlja u bazenima za odležavanje do trenutka (najmanje šest mjeseci) tolikog smanjenja radioaktivnosti (istrošeno je gorivo izvanredno snažno radioaktivno) da se može trajno pohraniti u posebno pripremljena odlagališta (kako bi i dalje bilo neopasno za okoliš).

(„Prerada“ ozračenog goriva jest odvajanje, prvenstveno, ostataka U-235 (ima ga između 0,75 do 1% u „istrošenom gorivu“, dakle više nego u prirodnom uraniju), Pu-239 (0,9%) i U-238 (94,5%) iz ozračenog goriva izvađenog iz nuklearnog reaktora kako bi se u nuklearni reaktor stavilo „sijež“ (neupotrijebljeno) nuklearno gorivo, kako plutonij, i U-235, koji bi se iz takvog goriva izdvojili, ne bi bili zloupotrijebljeni u vojne svrhe i kao materijal za terorističke akcije. Time bi nuklearno gorivo na bazi uranija ostalo samo (jako) djelomično iskorišteno. Ako se, naime, ozračeno gorivo preradi, U-235 i plutonij mogu se iskoristiti za nuklearnu fisiju i u termičkim i u oplodnim reaktorima, a uranij 238 kao oplodni materijal u oplodnim reaktorima.)

Naime, pokraj svakog se nuklearnog reaktora, u krugu nuklearne elektrane, zbog sigurnog rukovanja s istrošenim (ozračenim) gorivom, nalazi (veliki) „bazen za odležavanje“ napunjen običnom vodom. U taj se bazen pohranjuje, čim se izvadi iz nuklearnog reaktora, ozračeno gorivo budući da ono, premda je zaustavljena lančana reakcija, i dalje zrači. Radi se o radioaktivnom, po život opasnom zračenju, pa treba stoga onemogućiti prodor radioaktivnog zračenja u okolicu: stupac vode u bazenu dostatan je za to. Nadalje, premda se više ne odvija raspadanje jezgara U-235, niti Pu-239, pa se prema tome ne proizvodi ni unutrašnja kalorička energija iz nuklearne energije fisije, ozračeno je gorivo i dalje generator toplinske energije koja nastaje transformacijom iz unutrašnje kaloričke energije ozračenog goriva budući da je ono i nadalje radioaktivni izvor. Naime, mnoge atomske jezgre, nastale raspadom U-235 i Pu-239, nisu još u stanju najniže energije. Kako svaki sustav u prirodi teži mijenjanju prema stanju niže (najniže) energije, takve se jezgre raspadaju i oslobađaju višak energije emisijom čestica ili fotona povećavajući unutrašnju kaloričku energiju, time i temperaturu, ozračenog goriva. Premda se radi se o neznatnim količinama energije, u usporedbi s energijom koja se oslobađa za vrijeme lančane reakcije, tek nekoliko postotaka te energije, ozračeno gorivo treba hladiti; odvoditi toplinsku energiju u okolicu. U protivnom, i ta bi količina energije bila dostatna da se temperaturu ozračenog goriva povisi do temperature taljenja, što se mora spriječiti zbog sigurnosnih razloga. *(Rastali li se nuklearno gorivo, o tome ćemo govoriti kasnije, radioaktivnost bi prodirala u okoliš ugrožavajući živote i zdravlje.)* Ulogu hladila preuzima voda u bazenu na koju prelazi toplinska energija, transformirana unutrašnja kalorička energija ozračenog goriva, i voda u izmjenjivačima topline posebnog sustava, „sustava za hlađenje nuklearnih komponenata“ koji, uz hlađenje drugih komponenata nuklearne elektrane, služi i za hlađenje vode u bazenu upotpunjujući odvođenje toplinske energije preko slobodne površine vode u bazenu. Ta se toplinska energija pretvara ponovno u unutrašnju kaloričku energiju, no, pohranjenu sada u vodi bazena i vodi izmjenjivača topline. Zbog velike mase vode temperatura vode neznatno poraste i zatim se vrlo brzo uspostavlja toplinska ravnoteža s okolicom (okolnim zrakom, vodom): zbog razlike između temperature vode u bazenu i izmjenjivačima topline, koja je viša, i temperature okolnog zraka (vode), koja je niža, unutrašnja se energija vode pretvara u toplinsku energiju koja prelazi u okolicu (zrak, vodu) ponovno se pretvarajući u unutrašnju kaloričku energiju. Na taj se način temperatura vode u bazenu, a time i temperatura ozračenog goriva, održava konstantnom na malim vrijednostima. Ozračeno gorivo može neograničeno dugo ostati u bazenu ili se, nakon što se

protokom vremena smanjio intenzitet radioaktivnog zračenja, izvući iz bazena i preraditi ili pohraniti u, za tu svrhu, ponovimo, posebno pripremljenim odlagalištima.

U lakovodnim reaktorima (obična) voda usporava neutrone omogućujući odvijanje i kontroliranje lančane reakcije. Obična voda, međutim, i „guta“ (apsorbira) neutrone smanjujući potreban višak neutrona za odvijanje lančane reakcije. Naime, da bi se odvijala fisija treba sićušnu metu (jezgru U-235) pogoditi s još sićušnjim projektilom (neutronom). Vjerojatnost je tog događaja izvanredno mala. Pokazuje se, povećava se, ukoliko se sporim neutronima (neutronima male energije) „gađa“ jezgra. (Zbog toga se neutroni usporavaju, „moderiraju“.) Kako bi se kompenzirao manjak neutrona, gorivo u lakovodnim reaktorima mora biti (malo) „obogaćeni uranij“; u prirodnom je uraniju posebnim postupcima povećan postotak U-235 na (do) 5 %..

(U reaktorima s brzim neutronima postotak obogaćenja iznosi i do, graničnih, 40%.)

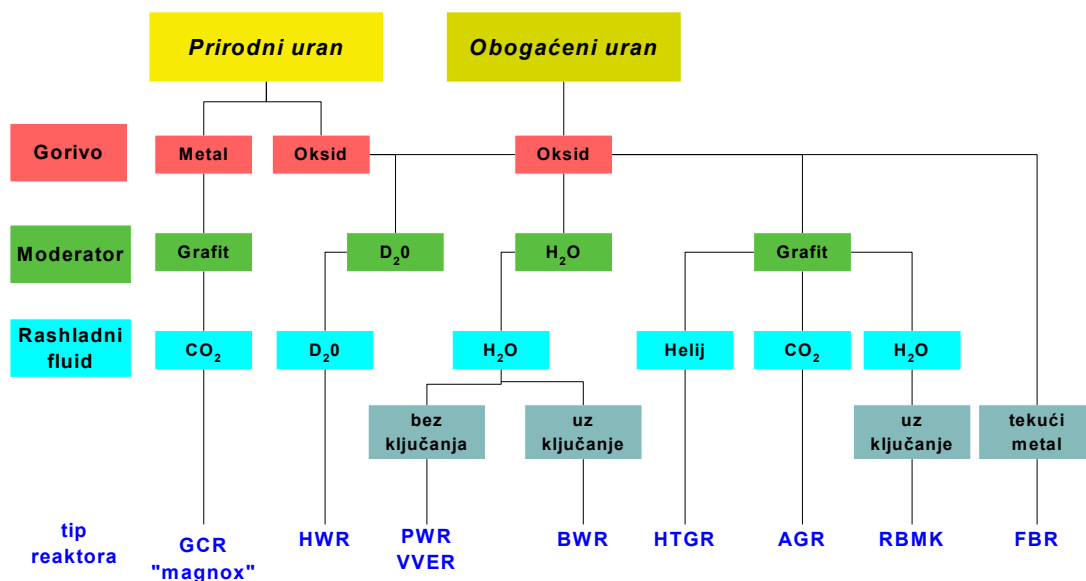
Za razliku od lakovodnih reaktora, „teškovodni reaktori“ mogu iskoristavati prirodni uranij kao nuklearno gorivo. Teškovodni su reaktori naime oni u kojima je moderator teška voda (D_2O). Teška voda usporava neutrone ali ih ne apsorbira („guta“) poput obične („lake“) vode (H_2O), pa nije potrebno obogaćivati uranij, što je prednost u odnosu na lakovodne reaktore. Ta se prednost poništava međutim troškovima „proizvodnje“ teške vode tako da ni jedna vrsta reaktora nije u prednosti pred drugom: nuklearne su elektrane s reaktorom moderiranim i hlađenim teškom vodom u osnovi slične nuklearnim elektranama s reaktorima koji su hlađeni i moderirani običnom vodom, uz razliku što je u primarnom krugu obična voda zamijenjena teškom vodom. Uporaba teške vode za hlađenje i moderiranje omogućuje da se kao nuklearno gorivo upotrijebi prirodni uranij, što nije moguće s reaktorima s običnom vodom.

(Jedna se vrsta teškovodnog reaktora naziva „CANDU“ jer ga razvijaju Kanadani: CANDU je kratica za "CANada Deuterium Uranium".)

Razvijeni su i još se razvijaju brojni tipovi termičkih reaktora. Mogu se klasificirati prema nuklearnom gorivu, moderatoru (sredstvu što usporava neutrone) i prema rashladnom sredstvu (sredstvu koje sudjeluje u procesu (procesima) pretvorbe nuklearne energije fisije u električnu energiju preuzimajući i prenoseći u daljnje procese nuklearnu energiju fisije transformiranu u toplinsku energiju u nuklearnom reaktoru), Slika 1-23. S obzirom na nuklearno gorivo (prirodni ili obogaćeni uranij, metalni uranij ili oksid uranij), dva su osnovna tipa termičkih reaktora: reaktori s prirodnim uranijem i reaktori s malo (slabo) obogaćenim uranijem (između 1 i 5%). Umjesto obogaćenog uranija može se djelomično upotrijebiti i plutonij.

Moderator može biti: obična voda, teška voda, grafit, berilij, berilij-oksidi, organske tekućine i cirkonij-hidrid, a rashladno sredstvo: obična i teška voda (obje pod tlakom ili s isparivanjem u nuklearnom reaktoru), organske tekućine, natrij, smjesa natrija i kalija, rastaljene soli te plinovi kao zrak, ugljik-dioksid, helij i vodena para.

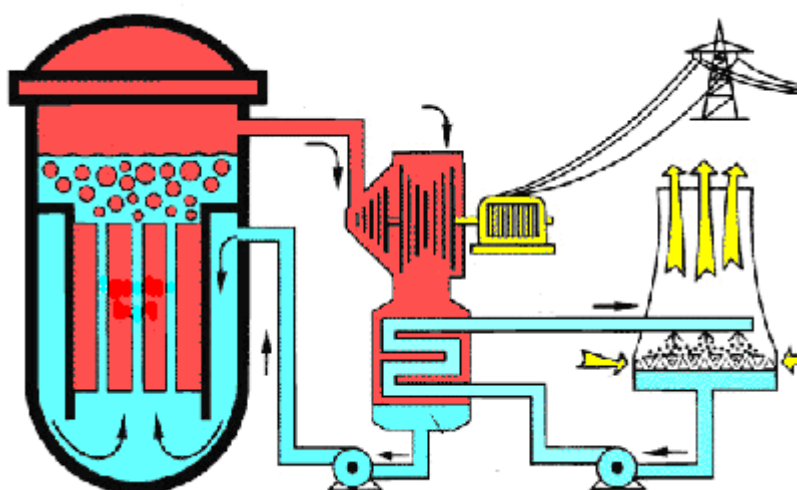
Kombiniranjem moderatora i rashladnog sredstva u reaktorima s prirodnim i obogaćenim uranijem do danas je razvijeno tridesetak tipova nuklearnih reaktora.



Slika 1-23 Pregled tipova nuklearnih energetske reaktora

Najzastupljeniji su među njima ovi reaktori (poredani prema važnosti za današnju nuklearnu energetiku), Slika 1-23:

- **reaktor hlađen i moderiran običnom vodom** Taj se reaktor izvodi u dvije varijante: voda u reaktoru ima tlak viši od tlaka isparivanja, pa se, najčešće, naziva tlakovodnim reaktorom (reaktorom s vodom pod tlakom), Slika 1-21, engleska kratica PWR (Pressurized Water Reactor), ruska VVER (vodo-vodnoj energetske reaktor), ili, voda u reaktoru kipi („kipući reaktor“) pretvarajući se u paru koja se odvodi u parnu turbinu; nuklearna elektrana ima samo jedan rashladni krug, Slika 1-24. Engleska je kratica za taj tip reaktora BWR (Boiling Water Reactor). U oba slučaju nuklearno je gorivo oksid obogaćenog uranija, UO₂



Slika 1-24 Funkcionalna shema nuklearne elektrane s kipućim reaktorom

- **reaktor hlađen i moderiran teškom vodom** (teškovodni reaktor) Engleska kratica za reaktor je HWR (Heavy Water Reactor). Reaktor je ujedno i tlakovodni, a gorivo je oksid prirodnog ili obogaćenog uranija.
- **reaktor moderiran grafitom i hlađen ugljik-dioksidom** (plinom hlađeni reaktor) Radi se o dvije verzije reaktora: prvoj generaciji reaktora, poznatoj pod nazivom magnox, ime je dobila po leguri magnezija koja se upotrebljavala kao materijal za obloge šipki, a gorivo je bio metalni prirodni uranij, te drugoj, obilježavanoj kraticom AGR (Advanced Gas Reactor), koja se bitno razlikovala u izvedbi i materijalu gorivnih šipki čije su obloge bile od nehrđajućeg čelika, a gorivo je oksid obogaćenog uranija.
- **reaktor moderiran grafitom i hlađen kipućom vodom** Reaktor tog tipa gradi se samo u bivšem SSSR-u, a označava se kraticom RBMK (reaktor boljšoj moćnosti kipjaščij). Gorivo reaktora je oksid obogaćenog uranija.
- **reaktor moderiran grafitom i hlađen helijem** Taj reaktor, poznat kao visokotemperaturni reaktor, kratica HTGR (High Temperature Gas Reactor) je posljednji korak u razvoju grafitom moderiranih reaktora. Gorivo reaktora je oksid obogaćenog uranija.
- **brzi oplodni reaktor**, kratica FBR (Fast Breeder Reactor) Svi dosad navedeni tipovi reaktora pripadaju kategoriji termičkih reaktora u kojima moderatori usporavaju neutrone do „termičkih“ brzina. Brzi oplodni reaktor nema moderatora, a gorivo je oksid uranija višeg obogaćenja ili oksid plutonija.

Osim ovih reaktora u nuklearnim su energetske postrojenjima pokusno upotrebljavani još neki tipovi nuklearnih reaktora. Primjerice, reaktori moderirani teškom vodom a hlađeni plinom i običnom vodom, te reaktori hlađeni organskim hladilom. Slično, očekuje se da se neki od navedenih tipova reaktora (vrlo vjerojatno) ne će više upotrebljavati u bliskoj budućnosti. To se ponajprije odnosi na grafitne reaktore (s iznimkom visokotemperaturnog reaktora). Relativna važnost pojedinih reaktorskih tipova za nuklearnu elektroenergetiku najbolje se može uočiti iz njihove rasprostranjenosti u pogonu, Tablica 1-2. Naročito je indikativan broj postrojenja u gradnji.

Tablica 1-2. Rasprostranjenost nuklearnih reaktora u svijetu potkraj 2008. godine

<i>Tip reaktora</i>	<i>Reaktori u pogonu</i>	<i>Reaktori u izgradnji</i>	<i>Obustavljeni reaktori</i>
PWR	265	34	33
BWR	94	3	21
GCR	18		34
FBR	2	2	6
HTGR			4
HWGCR			3
HWLWR			2
LWGR	16	1	8
PHWR	44	4	5
SGHWR			1
X			2
	$\Sigma 439$	$\Sigma 44$	$\Sigma 119$

PWR = Pressurized Water Reactor

BWR = Boiling Water Reactor

GCR = AGR & Magnox = Gas Cooled Reactor

FBR = Fast Neutron Reactor

HTGR = High Temperature Gas Reactor

HWGCR = Heavy Water Gas Cooled Reactor

HWLWR = Heavy Water Moderated, Light Water Cooled Reactor

LWGR = RBMK = Light Water Graphite Reactor

PHWR = Pressurized Heavy Water Reactor 'CANDU'

SGHWR = Steam Generating Heavy Water Reactor

X = ostali

(Budući da je naša, zasad jedina, nuklearna elektrana (u suvlasništvu s Republikom Slovenijom, 50:50 %) nuklearna elektrana s tlakovodnim reaktorom, te da je taj tip nuklearnih elektrana daleko najzastupljenije u nuklearnoj elektroenergetici, Tablica 1-2, to ćemo u poglavlju 10. razmatrati samo takvu nuklearnu elektranu.)

Tlakovodni reaktori, koji prevladavaju u nuklearnoj elektroenergetici današnjice, svoj razvoj dobrim dijelom zahvaljuju činjenici da je njihova prvotna uloga bila pogoniti ratne brodove i podmornice, pa je njihov razvoj bio sufinanciran od vojnih ustanova velesila (SAD, SSSR, Velike Britanije, Francuske, ...). Naime, razvoj potpuno novog tipa reaktora veoma je skup (više desetaka milijarda dolara) jer uključuje opsežan studijski i analitičko-istraživački rad, razvoj opreme, projekt, pogonsku dokumentaciju, gradnju prototipskog postrojenja, prikupljanje pogonskog iskustva i obiman proces licenciranja (dobavljanja dopuštenja za rad). Zbog toga je razvoj početno nastalih reaktorskih sustava bio dugotrajan i uključivao samo postupna poboljšanja, a ne korjenite promjene koncepcije. Čak obrnuto, neki u početnoj fazi predloženi reaktorski sustavi („homogeni reaktori“, reaktori s organskim hladilom, lakovodni i plinom hlađeni reaktori moderirani teškom vodom, grafitni reaktori s prirodnim uranom) postupno nestaju iz nuklearne elektroenergetike. Zbog toga je malo vjerojatno da će se razviti potpuno novi tip nuklearnog reaktora, čak ni u daljoj budućnosti. Umjesto toga postupni razvoj reaktorskih sustava najvećim dijelom uključuje povećanja sigurnosti (uključujući i „pasivnu“ sigurnost što znači služenje „prirodnim“ silama (gravitacijskom primjerice), a ne „tehničkim“ silama koje zahtijevaju potrošnju energije) postojećih izvedaba lakovodnih reaktorskih sustava.

Uvažavajući tu činjenicu i predviđanja nuklearne bismo reaktore (nuklearne elektrane) mogli podijeliti u 4 generacije (prema projektnim karakteristikama odnosno vremenima ulaska u komercijalni pogon):

- prva generacija uključuje prototipna postrojenja koja su u pogon ulazila pedesetih godina 20. stoljeća;
- drugu generaciju predstavljaju nuklearne elektrane koje su radile krajem 20. i koje rade početkom 21. stoljeća (tu pripada i nuklearna elektrana „Krško“);
- treća generacija nuklearnih elektrana postrojenja su napredne izvedbe koja se koriste poboljšanjima postojeće tehnologije povećavajući sigurnost i ekonomičnost (npr. intenzivnija upotreba oblika pasivne sigurnosti) i
- elektrane četvrte generacije koje će ući u pogon nakon 30-tih godina 21. stoljeća.

Spomenuto je, od torija se može, djelovanjem neutrona u termičkom reaktoru, dobiti fisijski materijal U-233. Zbog toga se može torij, poput U-238, upotrijebiti kao oplodni materijal. Budući da torija ima više nego uranija, nastoje se razviti procesi za

energetsko iskorištavanje torija. Najveća je prednost nuklearnog ciklusa $\text{Th-232} \rightarrow \text{U-233}$ u odnosu na ciklus $\text{U-238} \rightarrow \text{Pu-239}$ u tome što U-233 ima veći neutronske prinos po fisiji, pa je potrebno manje goriva za jednaku snagu reaktora. (Kad nastane fisija U-233, emitiraju se dva do tri neutrona, a za lančanu je reakciju dostatan jedan neutron. Ako se taj višak neutrona iskoristi za proizvodnju U-233 od Th-232, moguće je dobiti faktor konverzije veći od jedan (više se umjetnog nuklearnog goriva dobiva iz torija nego iz U-238), što je velika prednost torija. Nuklearnim torijskim reaktorima mogao bi se, promatrano dugoročno, ostvariti ekonomičniji gorivi ciklus nego upotrebom drugih tipova reaktora. Neki unaprijedjeni tipovi torijskih reaktora izgleda da mogu proizvoditi dostatno U-233 da bi se mogao ostvariti sustav koji bi sam sebe održavao i u koji ne bi trebalo dodavati obogaćeni uranij. Takav bi sustav bio pogodan za zemlje koje ne raspolažu s većim količinama fisijskih materijala i koje nastoje osloboditi se uvoza (obogaćenog) uranija.)

Ciklus $\text{Th-232} \rightarrow \text{U-233}$ ima međutim i veliki nedostatak jer je za početno punjenje potreban visokoobogaćeni uranij ili plutonij, a postoje i dodatne poteškoće u preradi goriva zbog jakog γ -zračenja torija koji emitira i α -čestice.

1.12 O nekim pitanjima i mjerama (pouzdanje) opskrbe (električnom) energijom

Osnovne su značajke razvoja današnjeg ljudskog društva nagli i veliki porast broja ljudi, brzi razvoj tehnike i tehnologije, te težnja za višim životnim standardom, pri čemu je najneophodniji uvjet za takav razvoj pouzdana i sigurna opskrba energijom. Jedna je od temeljnih zadaća pritom odrediti i ispitati utjecaj i posljedice stohastičke (vjerojatnosne) prirode energetskog (elektroenergetskog) sustava na opskrbu energijom te usporedbom različitih rješenja ustanoviti je li nađena najekonomičnija ravnoteža između troškova postojane (pouzdanje i sigurne) opskrbe i cijene (šteta) nedostavljene (neisporučene) energije budući da preostali zahtjevi mogu biti jedanput u tolikoj mjeri međusobno ovisni da ih je nemoguće strogo odvojiti, a drugi put, pak, zadovoljenje nekog od zahtjeva posve isključuje ostale. Takve dileme trebala bi rješavati i razriješiti „teorija pouzdanosti“. Za sada je, međutim, još uvijek, kvantitativna primjena teorije pouzdanosti u energetskom sustavu u razvoju pa je njena uloga svedena uglavnom na kvalitativna razmatranja. Ta činjenica iznenađuje budući da je pouzdana opskrba energijom oduvijek bila temelj gospodarstva razvijenih, industrijskih zemalja: spomenute su krize pokazale od kakve je presudne važnosti opskrba električnom energijom, odnosno energijom (naftom), kako za industrijske ("razvijene") zemlje tako i za "zemlje u razvoju". (*Očito, radi se o jako kompliciranoj teoriji.*) Ističemo naftu, između oblika energije, budući da je ona još uvijek, a bit će i u dogledno vrijeme, stožer (temelj) energetike jer zauzima oko polovine svjetskog tržišta energijom i jer danas, tridesetak godina nakon što je embargo na naftu istaknuo pitanje energetske sigurnosti i pouzdanosti u sam vrh svjetskog zanimanja, te dvadesetak godina nakon što je revolucija u Iranu probudila strahovanja od još gorih energetskih prilika, ponovno jača zabrinutost zbog nepouzdanje opskrbe energijom (naftom i plinom) i pojave novih (starih) kriza u posljednjem desetljeću prošlog stoljeća i prvim godinama ovog. U kojoj su mjeri zabrinutost i strahovanje opravdani? Prijete li nam još teže krize ili je doživljavanje i preživljavanje, uz drukčije energetsko ponašanje, tegobnog i gorkog iskustva iz sedamdesetih godina prošlog stoljeća promijenilo energetske zbilje toliko da potrošači (kupci) mogu očekivati jedno dulje razdoblje u kojem dostupnost energiji ne će biti ni ekonomski ni politički ograničena? Odgovor je, dakako, u domaćaju predviđanja, ali, istodobno, i mnogo

stvarniji: da bi se potvrdio mora propisati načine ponašanja koje će morati prihvatiti čovječanstvo ne želi li ugroziti svoj opstanak. Mnoštvo, naime, pokazatelja opominje ukazujući na opravdanost zabrinutosti, no, srećom, iako zbunjujuće, postoji i ne manje uvjerljivih naznaka što upućuju na vjerovanje da je ostvareno pouzdanije energetske uporište od očekivanog. Ironično ili ne, tome su doprinijele upravo energetske krize; prevladavanjem kriza i razumijevanjem pokazatelja kriza dokučit će se zasade uspješnijeg energetskog ponašanja što će jamčiti bezbrižniju energetska budućnost.

Bit je energetske pouzdanosti, istaknimo, da osigura odgovarajuću, količinski i kvalitetom dostatnu, opskrbu energijom po razumnim cijenama i na načine koji ne ugrožavaju nacionalne (ljudske) vrijednosti i ciljeve. Nije stoga naročito teško zamisliti vrstu događaja koji bi mogao izazvati energetska krizu. Zapravo, pitanje nije u tome hoće li se zbiti događaji koji će ugroziti pouzdanost opskrbe energijom ili energetske zalihe - jer će ih nesumnjivo biti, bili oni političke, vojne ili tehnološke prirode - već u kojoj će mjeri samo energetska tržišta biti elastičnija i hoće li mjere pouzdanije opskrbe energijom polučiti uspjeh. No, nažalost, postoji pritom i mnogo toga što je neizvjesno (nepouzđano), na pragu 21. stoljeća, počevši od količina zaliha nafte izvan OPEC-a, usmjeravanja naraslih novčanih viškova u zemlje u razvoju, što je dovelo do velikog međunarodnog zaduživanja i prouzrokovalo današnju neprekidnu dužničku krizu potkopavajući time razvoj mnogih zemalja i prijeteci im gubitkom nacionalne autonomije i političke neovisnosti, točnih zaliha neobnovljivih izvora energije (nafte i prirodnog plina), stvarnog utjecaja energetske pretvorbi na okoliš (pitanje porasta temperature zbog „efekta staklenika“), ekonomskog rasta razvijenih i nerazvijenih, rasta broja stanovnika planeta, itd, itd, pa do tehnološkog razvoja koji može bitno promijeniti stanje opskrbljenosti energijom i pouzdanost opskrbe, da bi odgovor bio jednostavan, lako razumljiv ili, barem, jednoznačan.

Ograničeni opsegom (i nakanjenim sadržajem) ovog udžbenika ne razmatramo stoga (detaljno sve) elemente energetske krize i pouzdane opskrbe energijom, koji bi trebali omogućiti propisivanje energetskog ponašanja, već navodimo samo kratko važnije pokazatelje, nedoumice i pitanja energetske sadašnjosti i budućnosti, ostavljajući za detaljnija i višeobuhvatnija promišljanja njihovo tumačenje, i ističemo samo spoznaje i zaključno mjere što će povoljno utjecati na dostatnost, cjenovnu prihvatljivost, pouzdanost i sigurnost opskrbe energijom:

- nafta je stožer energetike, još uvijek najvažniji izvor energije za industrijski svijet. Radi li se o prometu, ne postoji nikakva značajnija zamjena;
- većina je danas poznatih rezervi nafte smještena daleko od glavnih svjetskih potrošača; nafta prelazi mnoge granice i putuje morem i kopnom preko velikih udaljenosti. Više nego li bilo koja druga roba, ili oblik energije, nafta je tijesno isprepletena s nacionalizmom i državnom moći; za njezinu se kontrolu vode političke i oružane borbe;
- potražnja za naftom (ponovno) raste, može se očekivati i daljnje povećanje proizvodnje u zemljama izvan OPEC-a. Vlade tih zemalja sklone su smanjiti poreze kompanijama koje su voljne investirati kako bi spremne dočekale, predvidljivo, daljnje povećanje cijene nafte i dobro zaradile;
- postaje li dobavljanje nafte iz prirodnih izvora sve otežanijim?;
- hoće li ekološki proturazlozi kočiti uporabu nafte (u elektroenergetici barem)?;

- količine su nafte, po svemu sudeći, ipak konačne, dakle iscrpljive? (Postoje hipoteze o mogućnosti anorganskog dobivanja nafte.);
- povećanje cijene nafte snažno potiče inflaciju do mjere da ona izgleda nerješivi problem, uzrokuje recesije, nezaposlenost, ekonomski pad i političke probleme koji se vrlo teško rješavaju i u zapadnim demokracijama?;
- naftna kriza nije izmijenila svjetsku politiku: prijetnja uskraćivanja nafte pogađa više izvoznike od bogatih uvoznika?;
- poremećena opskrba naftom nije jedina prijetnja energetskej stabilnosti; nova nuklearna nezgoda (nesreća) bila bi veća?;
- utjecaj informatičke revolucije: danas je većina tržišnih informacija gotovo trenutačno dostupna svim zainteresiranim što znači da je vrijeme reagiranja daleko kraće, da su razna energetska tržišta tješnje povezana i da neposrednije utječu jedna na druge;
- utjecaj eskalirane brige za okoliš (Kyoto sporazum): hoće li uzrokovati udaljšavanje od fosilnih goriva što bi opet, posljedično, rezultiralo novim nedoumicama glede energetskih mjera, velikom zbrkom u energetskim industrijama i dodatnim troškovima?;
- manipulacije opskrbom naftom (i plinom) u političke svrhe; valja razmisliti o ukupnim potrebama, viškovima, proizvodnim kapacitetima da bi se izbjegle nestabilnosti energetskog sustava i onemogućile zlorabe: primjerice, kada je rat na Bliskom Istoku doveo do embarga na arapsku naftu i prvog "naftnog šoka", jedva da su postojale neke rezerve u svijetu na koje se moglo osloniti;
- smanjenje udjela OPEC-a u opskrbi, stvorene strateške rezerve, preorijentacija na ugljen i plin, supertanker i naftovodi (iransko-irački rat promovirao je potrebu za supertankerima i potaknuo izgradnju naftovoda);
- nestabilnosti Bliskog Istoka i Zaljeva;
- razvoj primjene drugih oblika energije (obnovljivih, fuzije), smanjenje potrošnje energije po jedinici bruto nacionalnog proizvoda;
- viškovi u energetskom sustavu: kojom će brzinom nestajati?;
- hoće li, postigne li se, sigurnija energetska opskrba usporiti (zaustaviti) napore poboljšanja energetske efikasnosti (djelotvornosti)?;
- koliko (energije) košta gospodarenje energijom (koliko košta racionalna uporaba energije)?;
- je li briga za životnu sredinu danas (okoliš) jedini (isključivi) pokretač energetske efikasnosti, kao što je to bio slučaj sa cijenom energije sedamdesetih godina prošlog stoljeća, ili je efikasnost (djelotvornost, racionalnost) ugrađena (inherentna) u energetske sustav;
- može li se predvidjeti porast potrošnje energije (nafte) u zemljama u brzom razvoju (Kini, Indiji, ...)?;
- koliko (stvarno) ima (još) nafte, prirodnog plina i ugljena?;
- ne poboljša li se tehnologija izgaranja i pohranjivanje (skladištenje) CO₂, hoće li restriktivne mjere ograničiti uporabu ugljena (Kyoto protokol /sporazum/)?;
- hoće li današnja nedorečenost propisa i nadalje otežavati izgradnju nuklearnih elektrana?;

- skreće li zabrinutost zbog globalnog zagrijavanja pozornost na nove generacije manjih, inherentno pouzdanih nuklearnih reaktora?

Razmišljati, dakle, o neizvjesnostima prigodom procjenjivanja (pouzdanje) opskrbe energijom znači suočiti se sa stvarnošću, prepoznati i razumjeti nepouzdanosti od bitne važnosti za donošenje energetske odluke kako u državnom tako i u privatnom sektoru. U takvim okolnostima, koje mjere predložiti (hrvatskoj, svjetskoj) energetskej politici sa stajališta (pouzdanje) opskrbe energijom? Nameću se gotovo same:

- usporiti porast potrošnje nafte (što manje ovisiti o nafti /uvozu nafte/), odnosno potrošnju za energetske pretvorbe (Nafta je nezamjenjiva, praktički; u svim tehnološkim procesima.);
- ojačati industriju nafte i plina;
- povećati uporabu prirodnog plina;
- povećati stupnjeve djelovanja (energetsku korisnost, efikasnost, učinkovitost, djelotvornost);
- potpomagati istraživanja i razvoj (obnovljivi izvori, fuzija);
- osigurati konkurentna energetska tržišta; i
- ponovno razmotriti prednosti nuklearne energije (fisijske – brzi oplodni reaktori) u traženju trajnijeg rješenja opskrbe električnom (i toplinskom) energijom.