

Ivan Flegar
ii.flegar@gmail.com

00-00

ENERGIJA KAO KVAZIMATERIJALNA VELIČINA

„Stvarnost je klizava riba koja se može uhvatiti samo na udicu metafore.“
Ursula Le Guin (1929. – 2018.)

Sažetak: Energija je jedan od najvažnijih prirodoznanstvenih pojmova za opisivanje i objašnjavanje ponašanja fizičkih sustava. No, poimanje tog apstraktnog prirodoznanstvenog pojma nije lagana zadaća jer energija nije tvar, osjetilno iskustvo ili pojava, niti je izravno opažljiva ili mjerljiva fizikalna veličina. Važan korak prema razumijevanju prirodoznanstvenog pojma energije jest ako se energija polazno shvati kao kvazimaterijalna veličina. Temelj kvazimaterijalnog poimanja energije je konceptualna metafora: *Energija je tvar*. Ta metafora proizlazi iz zakona o lokalnom očuvanju energije. Iz te osnovne konceptualne metafore izvedeno je pet specifičnih konceptualnih metafora: energija kao tvar koja se može kvantificirati, može mijenjati oblik, može strujati, može biti nošena i koja se može uskladištiti. Svaka od tih konceptualnih metafora ističe i potiskuje različite karakteristike energije, no uzete zajedno one tvore jedan koherentan skup iskaza koji olakšava razumijevanje prirodoznanstvenog pojma energije.

Ključne riječi: energija sustava, konceptualna metafora, kvazimaterijalni pojam energije, prirodoznanstveni pojam energije, tvar, zakon o lokalnom očuvanju energije

Uvod

Energija je jedna od fizikalnih veličina koje su smislili prirodnostvenici i inženjeri da im pomognu u kvantitativnom istraživanju pojava u sustavima fizičkog svijeta. Njezin se iznos može izračunati na temelju fizičkih promjena koje se događaju u nekom sustavu ili dijelovima sustava, npr. zbog promjene gibanja dijelova sustava ili promjene položaja sustava u odnosu na okolinu. Uzrok svih fizičkih promjena u sustavima su sile, a energija sustava je mjera za količinu promjene koja se dogodila ili se može dogoditi u sustavu [6]. Energija sustava nije izravno opažljiva niti izravno mjerljiva veličina, ona je apstraktan matematički pojam izvan opsega ljudskih osjetila i poimanja na temelju svakodnevnog iskustva. Jedini način kako pojedinac može „iskusiti“ energiju u prirodostvenom (i tehničkom) smislu jest kada taj pojam koristi u proračunima i analizama pojava u sustavima fizičkog svijeta. Drugog načina nema.

Poteškoće nastupaju kada se taj apstraktan matematički pojam želi objasniti odnosno učiniti razumljivim. Put prema razumijevanju prirodostvenog pojma energije bitno otežava i to što se riječ ‘energija’ učestalo upotrebljava u svakodnevnom govoru u vrlo različitim kontekstima, gdje kao i u nizu ljudskih djelatnosti (ekonomija, politika, sport i dr.) ima posve drugačije značenje nego u prirodnim znanostima i tehnici. Tako se u svakodnevnom životu energija često povezuje s ljudskim aktivnostima ili motivima. Kaže se da je netko „pun energije“ ili da je „mnogo energije uložio u projekt“. Također, energija se u svakodnevnom životu uglavnom shvaća kao nešto što se proizvodi, kupuje, koristi i troši. Dakle, shvaća se kao resurs ili roba koja dolazi korisniku u različitim oblicima, kao što su to prirodni plin, ogrjevno drvo, ugljen, hrana i slično ili kao „električna struja na utičnici“. Prema tom laičkom (kolokvijalnom) poimanju energije, energija je neka vrsta tvari koja ima objektivnu opstojnost na isti način kao što ju imaju i svi drugi, prirodni i umjetni, fizički objekti u svijetu.

Jaz između laičkog i prirodostvenog poimanja energije može se premostiti ako se energija shvati kao kvazimaterijalna veličina. Energija nije materijalne prirode, nije tvar, ali ima neka svojstva karakteristična za tvari (količinu, mogućnost strujanja, skladištenja, nošenja i mijenjanja oblika), što omogućuje da se o energiji govori na jednostavan i zoran način u terminima bliskim svakodnevnom iskustvu. U članku je pokazano da je kvazimaterijalni pojam energije, iako utemeljen na fizikalno netočnoj premisi da je energija tvar, u velikoj mjeri sukladan pojmu energije kako ga vidi klasična fizika i važan je korak prema razumijevanju prirodostvenog pojma energije.

1. Prirodnoznanstveni pojam energije

1.1. Što je energija

U prirodnim znanostima i tehnici energija je jedna od fizikalnih veličina kojima se kvantitativno opisuju pojave u fizičkim sustavima. Pri tome se pod fizičkim sustavom smatra pojedinačan fizički objekt u međudjelovanju s okolinom odnosno dva ili više fizička objekta u međusobnom djelovanju i/ili u međudjelovanju s okolinom. Fizikalne veličine nisu fizički objekti nego čiste tvorevine ljudskog uma. To znači da je energija apstraktan, matematički pojam, kao što su to i masa, naboj, sila i druge fizikalne veličine.

Da bi se stekla jasnija predodžba zašto je prirodnoznanstveni pojam energije tako interesantan, ali i važan u istraživanju pojava u fizičkom svijetu, možda je najbolje citirati američkog fizičara Richarda Feynmana koji u svojim, danas legendarnim, predavanjima iz fizike započinje analizu pojma energije ovim riječima [4, Vol. I., str. 4–1]:

„Postoji jedna činjenica, ili ako hoćete, jedan zakon, koji upravlja svim prirodnim pojavama za koje danas znamo. Nema izuzetaka od tog zakona – on je koliko zasad znamo točan. To je zakon o očuvanju energije. On kaže da postoji određena veličina koju nazivamo energijom, koja se ne mijenja u svim promjenama kroz koje prolaze prirodni procesi. To je najapstraktnija ideja, jer je to matematički princip; ona kazuje da postoji neka brojčana vrijednost, koja se ne mijenja kad se nešto dogodi. Ona nije opis nekog mehanizma ili bilo čega konkretnog; to je neobična činjenica da mi možemo izračunati neki broj i kad završimo promatranje prirode i svih njezinih trikova i ponovno izračunamo taj broj, to je taj isti broj.“

U tom se citatu nalaze, ali iz njega i proizlaze neke važne tvrdnje. Prvo, da energija nije nešto konkretno, neka tvar, ona je apstraktan, matematički pojam. To je brojčana vrijednost koja ostaje nepromijenjena tijekom svih fizičkih, kemijskih i bioloških procesa u prirodi. Pod prirodom se ovdje misli na fizički svijet u cjelini – svemir – dakle, na sve prirodno i umjetno stvoreno što opažamo našim osjetilima i mjernim uređajima. Zakon o očuvanju energije je jedan od velikih zakona očuvanja¹, vrijedi bez izuzetaka i globalno, tj. za cijeli fizički svijet. On je temeljno prirodno načelo, ne i idealizacija koju će prirodnoznanstvenici jednog dana odbaciti nakon dubljeg istraživanja i razumijevanja prirodnih pojava. Zakon o očuvanju energije izražava na jedan specifičan način jedinstvo fizičkog svijeta povezujući različita područja fizike,

¹ Među velike zakone očuvanja u klasičnoj fizici ubrajaju se još i zakon o očuvanju količine gibanja, zakon o očuvanju momenta količine gibanja i zakon o očuvanju naboja. Svi vrijede globalno, tj. za čitav fizički svijet.

kemije i biologije. Može se reći da bez zakona o očuvanju energije pojam energije ne bi postojao kao prirodoznanstveni pojam.

Drugo, energija nije opis mehanizma kojim se može objasniti kako se ili zašto neki proces odvija niti je sama po sebi uzrok ičemu. Za objašnjenje ili otkriće uzroka kako se i zašto neki proces odvija potrebno je upotrijebiti druge fizikalne veličine, kao što je to sila ili u spontanim procesima (termodinamička) entropija. Zakon o očuvanju energije ne predviđa što će se dogoditi, najviše što može jest predvidjeti ono što se ne može dogoditi, tj. svaki proces u kojem je taj zakon prekršen. Drugim riječima, ako zakon o očuvanju energije nešto ne dopušta, zabrana je bezuvjetna i ne ovisi o eventualnoj sukladnosti s drugim fizikalnim zakonima. Ako zakon o očuvanju energije nešto dopušta, dopuštenje je uvjetno jer odvijanje nekog procesa mora biti u skladu i s odgovarajućim drugim fizikalnim zakonima. Isto tako, iz činjenice da je energija uvijek očuvana ne može se objasniti zašto se neki proces odvija u jednom smjeru a ne u suprotnom smjeru. Sa stajališta energije oba su smjera jednakovrijedna.

Treće, Feynman u citatu ne daje nikakvu fizikalnu definiciju energije. Samo stranicu dalje piše da je „važno shvatiti da mi u današnjoj fizici ne znamo što je energija“ [4, Vol. I., str. 4–2]. Unatoč tomu, u prirodoznanstvenoj i tehničkoj literaturi mogu se naći razne definicije energije. Najčešća definicija jest da je energija nekog (fizičkog) sustava fizikalna veličina koja opisuje sposobnost tog sustava da obavi mehanički rad². Ta je definicija preuska jer ne uzima u obzir ostale vrste rada: električni prijenos, elektromagnetsko zračenje, energiju mehaničkih valova i dr. Također, uzme li se u obzir da se u općem slučaju rad definira kao prijenos energije iz jednog sustava u drugi bez stvaranja entropije [8], ta je definicija cirkularna. Naime iz definicije energije sustava kao sposobnosti sustava da obavi rad, a rad je jedan od načina prijenosa energije, proizlazi da je energija sustava sposobnost sustava da prenosi energiju, što je očigledna tautologija. Sa stajališta tehničke termodinamike ta je definicija netočna jer ne uzima u obzir da se ni u idealnom kružnom toplinskom procesu sva energija sustava nikad ne može pretvoriti u (mehanički) rad.

Nepostojanje općeprihvaćene prirodoznanstvene definicije energije podsjeća na status koji imaju primitivni (osnovni) pojmovi u okviru nekog interpretiranog formalnog sustava. Tamo se pod primitivnim pojmom smatra svaki pojam koji u okviru pripadnog interpretiranog formalnog sustava nije eksplicitno definiran. Smisao i značenje nekog primitivnog pojma postaju razumljivi tek u zajednici s ostalim primitivnim pojmovima i postulatima tog formalnog sustava te ispravnom upotrebom u različitim situacijama. Osnovnost

² Ne navodim literaturu koja daje tu definiciju energije jer je mnogobrojna i obično se može pronaći u starijoj literaturi. Modernija literatura je, posebno nakon Feynmanovih predavanja iz fizike, u tom pogledu opreznija pa se energija najčešće uopće ne definira. Dobar pregled povijesnog razvoja pojma energije i različitih definicija energije dan je u članku [6].

pojma energije u fizici jasno je ilustrirao američki fizičar Daniel Schroeder u udžbeniku termičke fizike [13, str. 17], ovim riječima:

„Da bih još bolje razjasnio o čemu je riječ, trebao bih vam sada stvarno dati preciznu definiciju energije. Nažalost, ja to ne mogu. Energija je najosnovniji dinamički pojam cjelokupne fizike i zbog toga vam ne mogu reći što je ona u terminima koji bi bili još osnovniji.“

Shvati li se energija kao primitivni pojam fizikalnih teorija, potraga za nekom fizikalnom definicijom energije postaje suvišna. Kudikamo je važnije znati kako tu fizikalnu veličinu upotrijebiti u analizi procesa u fizičkim sustavima, nego imati točnu definiciju energije.

1.2. Zakon o lokalnom očuvanju energije

Zakon o očuvanju energije ne vrijedi samo globalno, on vrijedi i za svaki dio fizičkog svijeta koji se može smatrati izoliranim sustavom. Pri tome se pod izoliranim sustavom smatra svaki sustav koji je toliko udaljen od drugih fizičkih sustava da između njega i drugih sustava nema međudjelovanja. Očigledno, fizički svijet je idealno izoliran sustav. Zbog sveprisutne gravitacije, ne postoje drugi idealno izolirani sustavi. Svaki je dio fizičkog svijeta samo manje ili više izoliran od ostatka fizičkog svijeta.

Izolirani sustav valja, dakle, shvatiti kao model koji opisuje samo jedan aspekt fizičkog svijeta – stupanj međudjelovanja između tijela koja čine promatrani sustav i ostatka fizičkog svijeta. To znači i da pitanje je li neki dio fizičkog svijeta izoliran ili nije ovisi o pitanju na koje se želi odgovoriti pri analizi tog dijela fizičkog svijeta. Primjerice, ako se želi odrediti putanja Zemlje oko Sunca, dovoljno je promatrati Sunčev sustav kao izolirani sustav, tj. zanemariti djelovanje drugih zvijezda u bliskoj okolini. Ili, ako se želi odrediti koju će visinu doseći vertikalno izbačena loptica poznate mase i početne brzine, može se, zanemarujući otpor zraka, s prihvatljivom točnošću smatrati da je fizički sustav koji čine loptica i Zemlja izolirani sustav i dobiti željeni rezultat primijenivši zakon o očuvanju energije.

U stvarnosti većinu u praksi interesantnih sustava čine neizolirani sustavi, tj. sustavi čije se međudjelovanje s okolinom odnosno drugim sustavima ne smije zanemariti. Za te sustave zakon o očuvanju energije tvrdi samo da je eventualno nedostajuća energija sustava negdje u ostatku fizičkog svijeta. To je u primjeni teško provjerljivo, pa je samim time ta informacija od male praktične koristi.

Drugi je pristup analizi, a koji vrijedi za bilo koji pojedinačan sustav – izoliran ili neizoliran – da se primijeni zakon o lokalnom očuvanju energije. Taj zakon počiva na načelu lokalnosti za koji se smatra da vrijedi za sve zakone klasične fizike. Načelo lokalnosti izriče da na neki fizički objekt izravno utječe samo njegova neposredna okolina. Prema tom načelu, ako između dva prostorno

odvojena fizička objekta postoji međudjelovanje, tada u međuprostoru mora postojati posrednik kojim se to međudjelovanje prenosi. U elektromagnetizmu taj je posrednik elektromagnetsko polje, dok je u mehanici taj posrednik gravitacijsko polje [11].

U tom se pristupu polazi od činjenice da se fizički svijet može uvijek zamisliti razdvojen na dvije cjeline: na analizirani sustav, koji zauzima dio prostora fizičkog svijeta, i okolinu, tj. ostatak fizičkog svijeta. Uzimajući u obzir načelo lokalnosti i zakon o očuvanju energije, vrijedi stavak da je svako smanjenje ili povećanje količine energije nekog sustava, odvojenog od okoline stvarnom ili zamišljenom granicom, u svakom trenutku uravnoteženo istodobnim povećanjem ili smanjenjem količine energije u neposrednoj okolini tog sustava.

Tim je stavkom formuliran zakon o lokalnom očuvanju energije. Uočimo da zakon o lokalnom očuvanju energije implicira zakon o očuvanju energije, dok obrat ne vrijedi.

Budući da zakon o lokalnom očuvanju energije vrijedi za sve sustave, polazište je u kvantitativnoj analizi pojava u sustavima. Za razliku od zakona o očuvanju energije, on govori samo o promjenama količine energije sustava, čime pomaže u traženju odgovora na važna praktična pitanja, kao što su „Koliko je energije nakon neke promjene u sustavu preneseno u okolinu?“ ili „Koliko je energije sačuvano u sustavu nakon neke promjene u sustavu ili okolini?“ i slična pitanja.

Ukupna količina energije sustava u praksi nije važna, osim u analizi nuklearnih procesa, gdje tek činjenica da su masa i energija tijela ekvivalentni omogućuje njihovo potpuno razumijevanje. U svim drugim slučajevima masu i energiju tijela valja shvatiti onako kako ih shvaća klasična fizika, tj. kao međusobno nezavisne pojmove (fizičke veličine). Tako će ih se interpretirati i u nastavku ovog teksta.

1.3. Kinetička, potencijalna i unutrašnja energija sustava

Kao što je u uvodu istaknuto energija nekog sustava je mjera za količinu promjene koja se dogodila ili se može dogoditi u tom sustavu. Ta se promjena očituje ili kao preraspoređivanje čestica sustava³ ili kao preraspoređivanje makroskopskih dijelova sustava (fizičkih objekata) pod djelovanjem sila u sustavu ili na sustav ili se obje promjene odvijaju istodobno.

Svaka čestica sustava može se istodobno promatrati na dva različita načina; s jedne strane čestica je „pojedinač“, dok je s druge strane čestica dio sustava. Time što je dio sustava, čestica je u međudjelovanju s drugim česticama

³ Pod česticama sustava razumijevaju se u ovom tekstu mikroskopski dijelovi sustava – atomi i molekule.

posredstvom gravitacijskog i/ili elektromagnetskog polja u kojima je uskladištena energija koja se naziva potencijalna energija međudjelujućih čestica. No, neovisno o tome postoji li ili ne postoji djelovanje između čestica, svaka pojedinačna čestica ima energiju samim time što postoji, tzv. energiju mirovanja čestice, a ako se giba posjeduje energiju gibanja koja se naziva kinetička energija čestice.

U okviru klasične fizike energija mirovanja čestica je konstantna, tj. ne ovisi o promjenama koje su se dogodile ili se mogu dogoditi u sustavu. To znači da je za određivanje energije sustava, tj. mjere za količinu promjene u sustavu, potrebno znati samo ukupnu kinetičku energiju čestica i ukupnu potencijalnu energiju međudjelujućih čestica. No, broj čestica koje tvore pojedini fizički objekt je neshvatljivo velik. Primjerice, u 1 cm^3 bakra ima oko $8,4 \cdot 10^{22}$ atoma, dok u 1 cm^3 vode ima oko $3,3 \cdot 10^{22}$ molekula. Zbog toga je određivanje energije sustava na temelju kinetičke energije čestica i potencijalne energije međudjelujućih čestica sustava neprovedivo. Za određivanje energije sustava potrebno je uz kinetičku energiju sustava i potencijalnu energiju sustava, koje se određuju na temelju gibanja i promjene položaja makroskopskih dijelova sustava, uzeti u obzir i ukupnu energiju čestica. Ta se energija naziva unutrašnja energija sustava; makroskopska je fizikalna veličina kojom se uzima u obzir nerazmršiva povezanost kinetičke energije i potencijalne energije enormnog broja međudjelujućih čestica u fizičkim objektima sustava.

Kinetička energija sustava jednaka je zbroju translacijske kinetičke energije težišta sustava, rotacijske kinetičke energije oko težišta sustava i energije pridružene radijalnom gibanju dijelova sustava u odnosu na težište sustava. Također, u kinetičku energiju sustava ubraja se i magnetska energija, tj. energija uskladištena u magnetskom polju [15]. Potencijalna energija sustava jednaka je zbroju gravitacijske, elastične, električne i kemijske potencijalne energije sustava [7]⁴.

Unutrašnja energija sustava je ukupna energija čestica promatrana iz referentnog sustava promatrača koji miruje u odnosu na težište sustava. Tim je ograničenjem osigurano da kinetička energija sustava zbog njegovog gibanja prostorom kao ni potencijalna energija sustava zbog djelovanja vanjskih polja sila (gravitacijskog i/ili elektromagnetskog) na sustav nisu uključene u unutrašnju energiju sustava. Unutrašnja energija sustava je korelirana s temperaturom sustava i njegovim agregatnim stanjem. Uključuje kinetičku energiju zbog nasumičnog translacijskog, rotacijskog i oscilatornog gibanja molekula sustava, oscilatornu potencijalnu energiju zbog sila između atoma u molekulama i električnu potencijalnu energiju zbog sila između molekula [14, str. 591].

⁴ Pridjevima 'translacijska, rotacijska, magnetska, gravitacijska i dr.' uz kinetičku odnosno potencijalnu energiju sustava istaknuti su različiti načini gibanja odnosno međudjelovanja u sustavu.

Istaknimo još da kinetička energija sustava i potencijalna energija sustava nisu intrinzična svojstva sustava jer ovise o položaju promatrača, tj. njegovog referentnog sustava. Primjerice, ako se referentni sustav promatrača giba istom brzinom i u istom smjeru kao promatrani sustav, translacijska kinetička energija sustava jednaka je nuli. Isto tako i gravitacijska potencijalna energija sustava može, ovisno o referentnom sustavu promatrača, imati vrijednost po volji pa i negativnu vrijednost. U analizi pojava u nekom konkretnom sustavu to ne predstavlja poteškoću jer su tada važne samo vrijednosti promjene količine kinetičke i potencijalne energije a ne i njihove apsolutne vrijednosti. Bitno je samo da je tijekom analize fiksiran referentni sustav promatrača.

2. Kvazimaterijalni pojam energije

2.1. Pojam konceptualne metafore

Riječi i jezični izrazi kojima se prirodosnanstvenici i inženjeri služe pri objašnjavanju energije, kao i sličnih apstraktnih pojmova, mogu stvoriti jasne slike u ljudskom umu samo ako se mogu lako povezati sa značenjima tih istih riječi i jezičnih izraza koja im ljudi uobičajeno pridjeljuju kad objašnjavaju konkretne pojmove bliske svakodnevnom iskustvu. To znači da su analogija ili metafora jedini načini kako se može razumjeti neki novi pojam. *X je nalik na Y*, standardan je oblik analogije, gdje je *X* riječ ili jezični izraz za apstraktan, manje poznat ili čak nepoznat smisleni sadržaj (predmet, svojstvo, radnja, odnos) iz tzv. ciljne domene, dok je *Y* riječ ili jezični izraz za konkretan, poznat ili vrlo poznat smisleni sadržaj iz tzv. izvorne domene. Frazom 'nalik na', eksplicitno se uspoređuje ciljna i izvorna domena. Ispusti li se ta fraza, analogija prelazi u metaforu, implicitnu usporedbu između ciljne i izvorne domene, danu iskazom *X je Y*.

Metafora je riječ ili jezični izraz koji se može razumjeti izvan svog doslovnog značenja u izvornoj domeni i pripada objema domenama, ciljnoj i izvornoj domeni. Ciljna domena, koja je apstraktna, razumije se u terminima izvorne domene, koja je konkretna, i najčešće bliska svakodnevnom iskustvu. Metaforom se jezično fiksira neki smisleni sadržaj iz ciljne domene, za koji u jezičnom fondu nema vlastitih izraza, posuđivanjem izraza iz izvorne domene [16].

Za razumijevanje apstraktnih pojmova važna je konceptualna (pojmovna) metafora⁵, gdje je *X* apstraktan pojam, a *Y* je konkretan pojam. Tom se metaforom

⁵ Pojam konceptualne metafore uveli su američki kognitivni lingvist George Lakoff i filozof Mark Johnson koji smatraju da se ljudski konceptualni (pojmovni) sustav u osnovi sastoji od skupa metaforičnih (apstraktnih) pojmova i skupa nemetaforičnih (konkretnih) pojmova. Nemetaforični

karakteristike koje definiraju apstraktan pojam X objašnjavaju istim terminima kojima se objašnjavaju karakteristike kojima je definiran konkretan pojam Y i čije je značenje kod uspješnih konceptualnih metafora lako razumljivo. Svojim utemeljenjem u ljudskom svakodnevnom iskustvu⁶, konceptualna metafora je moćan spoznajni alat koji omogućuje razumijevanje apstraktnih pojmova.

2.2. Osnovna konceptualna metafora za energiju

Osnovna konceptualna metafora za energiju dana je iskazom: *Energija je tvar*. Ta je metafora temelj kvazimaterijalnog poimanja energije⁷ i zdravorazumski proizlazi iz interpretacije zakona o očuvanju energije i zakona o lokalnom očuvanju energije. Zakon o očuvanju energije obično se daje u obliku: „Količina energije u fizičkom svijetu (izoliranom sustavu) je konstantna. Energija se ne može niti stvoriti niti uništiti.“. Tu izraz 'količina energije' kao i tvrdnja o nemogućnosti stvaranja odnosno uništenja energije upućuju na materijalnu prirodu energije, odnosno na njezino postojanje u fizičkom svijetu. Logički gledano, nema smisla tvrditi da je nešto očuvano ako to ne postoji. Također, to nešto mora postojati negdje jer je nemoguće zamisliti da nešto postoji a da se ne zamisli da postoji negdje. To 'negdje' je za energiju fizički sustav, što znači da kada se govori o prirodno-znanstvenom pojmu energije uvijek se misli na energiju nekog (fizičkog) sustava.

U formulaciji zakona o lokalnom očuvanju energije energiji su, također, implicitno pridijeljena svojstva karakteristična za tvari; svojstva strujanja (toka) odnosno prijenosa iz sustava u neposrednu okolinu i obratno te uskladištenja. Primjerice, prema zakonu o lokalnom očuvanju energije smanjenje ili povećanje količine energije u nekom sustavu u svakom je trenutku uravnoteženo povećanjem ili smanjenjem količine energije u neposrednoj okolini tog sustava. Energiju je u tom procesu kudikamo lakše zamisliti kao nešto konkretno, kao neku nevidljivu neopipljivu tvar što struji i prolazi granicom sustava iz sustava u okolinu ili obratno, nego kao broj, dakle, nešto apstraktno što se računa prema nekom skupu formula. Isto tako, iz prijenosa energije odnosno njezina strujanja

pojmovi uključuju prostornu orijentaciju (npr. gore – dolje, unutar – izvan), temeljne pojmove koji proizlaze iz utjelovljenog iskustva (npr. tvar, spremnik, osoba) i strukturirana iskustva i djelatnosti (npr. hranjenje, kretanje). Lakoff i Johnson tvrde i to su pokazali na velikom broju primjera da ljudi upotrebljavaju te nemetaforične (konkretno) pojmove da bi razumjeli apstraktne pojmove [9].

⁶ Budući da se konceptualne metafore temelje na svakodnevnom iskustvu, one imaju i kulturološke korijene. Primjerice, česta metafora u biologiji o stanici kao tvornici ne može nastati u društvu u kojem nema tvornica!

⁷ Svaka fizikalna veličina X za koju je jedna od konceptualnih metafora dana iskazom: *X je tvar*, naziva se kvazimaterijalna fizikalna veličina (engl. *substance-like physical quantity*). To su osim energije, npr. električni naboj, entropija i količina gibanja.

logički proizlazi da je energija u sustavu bila ili prethodno uskladištena ili ju je sustav mogao uskladištiti; u protivnom, prijenosa energije ne bi bilo.

Proizlazi da je, želi li se o prirodoznanstvenom pojmu energije govoriti jasno i razumljivo, neizbježna upotreba metaforičnih izraza. Možda su najbolji primjer za to Feynmanova predavanja iz fizike [4]. Za Feynmana je, i on to jasno ističe, energija apstraktan matematički pojam, brojčana vrijednost koja se ne mijenja ako se nešto dogodi, i ne kaže nigdje u tekstu predavanja mjera čega je ta brojčana vrijednost. Libanonski kognitivni lingvist Tamer Amin proveo je detaljnu analizu teksta Feynmanovih predavanja i našao da Feynman, kad mu tijekom objašnjenja neke pojave treba pojam energije, koristi isključivo metaforične izraze, najčešće one koji se koriste kad se energija promatra kao tvar [1]. Za njega je npr. energija *uskladištena u, oslobođena zbog*, posjeduje *količinu, putuje* naprijed i natrag, *dobiva se ili gubi*, itd. Slično vrijedi i za udžbenike drugih autora.

Da je konceptualna metafora o energiji kao tvari ukorijenjena u prirodoznanstvenu i inženjersku zajednicu dobro se vidi i u izboru fraza i termina koji se uobičajeno koriste u vezi s energijom⁸. Svojstva pridijeljena energiji, kao što su uskladištenje, prijenos, strujanje (tok), različitost oblika i dr. koja impliciraju njezinu materijalnost, izgledala bi sasvim neobično pa i neshvatljivo kad bi se pridijelila drugim fizikalnim veličinama. Tako, primjerice, nitko ne govori da je „masa uskladištena u tijelu“, ali je uobičajeno reći da je „energija uskladištena u kondenzatoru“ (točnije bi bilo „u električnom polju kondenzatora“). Nitko ne govori da se „tijekom sudara dvaju tijela dogodio prijenos brzine“, ali je uobičajeno reći da se „tijekom sudara dvaju tijela dogodio prijenos energije“. Također, nitko ne govori da „postoje barem dva oblika električnog naboja: elektronski i protonski naboj“, ali je uobičajeno reći da „postoji kinetička energija, električna energija i drugi oblici energije“.

Da bi bila uspješna, svaka konceptualna metafora mora biti kratka i jasna. Isto tako, pojam iz izvorne domene s kojim se identificira pojam iz ciljne domene treba biti blizak svakodnevnom iskustvu. Ti su uvjeti zadovoljeni za energiju jer je pojam tvari (materije) intuitivno jasan, a lako su razumljive i makroskopske karakteristike tvari koje se odabranom konceptualnom metaforom pripisuju energiji.

Poklapanje između pojma iz izvorne domene i pojma iz ciljne domene nikad nije potpuno; različiti su i konteksti u kojem se neka konceptualna metafora upotrebljava. Zbog toga je vrlo često potrebno više konceptualnih metafora da bi se neki složeniji apstraktni pojam razumio. To u punoj mjeri vrijedi za energiju zbog čega je važno umjesto opće konceptualne metafore za energiju, koja je

⁸ Slična je situacija i u informacijskoj tehnici, gdje osnovnu konceptualnu metaforu čini iskaz: *Podatak je tvar*. Iako nitko ne pomišlja da je podatak uistinu tvar, posve je uobičajeno reći da je npr. u kompaktnom disku pohranjeno (uskladišteno) x megabajta podataka, ili da se između nekog računala i interneta prenose podaci brzinom od y bitova u sekundi.

preširoka, koristiti više konceptualnih metafora u kojima se ciljano ističu jedne karakteristike energije, a ovisno o kontekstu potiskuju druge karakteristike energije.

U nastavku teksta opisano je pet konceptualnih metafora kojima su pojedinačno istaknute osnovne karakteristike energije⁹ proizašle iz zakona o očuvanju energije i zakona o lokalnom očuvanju energije. To su: energija kao tvar koja se može kvantificirati, tj. izračunati i iskazati brojčanom vrijednošću, koja može mijenjati oblik, koja može strujati, koja može biti nošena i koja može biti uskladištena.

2.3. Energija kao tvar koja se može kvantificirati

Richard Feynman u svojim predavanjima iz fizike [4, Vol. I., str. 4–1] objašnjava zakon o očuvanju energije kroz priču o majci i sinu kojem je majka jednog dana dala za igru 28 kocaka koje su neuništive i ne mogu se rastaviti na dijelove. Na kraju dana znatizeljna je majka ustanovila da štogod je njezin sin radio s kockama, njihov je broj ostao isti. Na kraju drugog dana ustanovila je da sin ima 27 kocaka, no nakon pažljive pretrage kuće našla je nedostajuću kocku ispod otirača pred ulaznim vratima. Iz dana u dan broj kocaka se mijenja (neke su izbačene kroz prozor, susjedov sin donio je svoje kocke, neke su kocke u kutiji koju sin ne dopušta otvoriti, neke su bačene u prljavu vodu), no majka koristeći matematičke iskaze odgovarajućih fizikalnih zakona izračunava broj kocaka koje joj nisu vidljive i utvrđuje da je ukupni broj kocaka cijelo vrijeme ostao nepromijenjen.

Pronalazeći sličnosti između dječakovih kocaka i energije Feynman bitno olakšava razumijevanje zakona o očuvanju energije. Što god dječak radio s kockama odnosno kakve god se promjene događaju u nekom promatranom sustavu, zbroj kocaka odnosno energija u oba je slučaja konstantan. Također, u oba se slučaja radi o zbroju koji se dobiva nakon niza proračuna prema međusobno nepovezanim matematičkim izrazima kojima su kvantitativno opisane promjene koje su se dogodile u majčinoj kući odnosno promatranom sustavu. Tom pričom Feynman ističe važnost poznavanja sustava, tj. jasnom definiranju njegovih granica. Na kraju Feynman efektno poentira, ističući svu „klizavost“ pojma energije, kad kaže da, što se energije tiče, ne postoje nikakve kocke koje bi nosile određenu količinu energije.

Ta je priča živopisna ilustracija konceptualne metafore o energiji kao tvari koja se može kvantificirati, tj. iskazati brojem koji ostaje isti, ma u kojem ga trenutku izračunali, unatoč svim promjenama u danom izoliranom sustavu.

⁹ Osnovne karakteristike energije su: očuvanje, prijenos, uskladištenje i transformacija (pretvorba).

Sličnih primjera u kojima se energija shvaća kao novac ili kao čista računovodstvena veličina ima mnogo.

Prema toj metafori energija se shvaća kao tvar koja je uskladištena (nalazi se) u nekom „spremniku“ ili na nekom „računu“ i koja se može prenositi između različitih „spremnika“ odnosno „računa“. Ta interpretacija energije korisna je u analizi izoliranih sustava jer omogućuje da se unutar sustava kvantitativno prate promjene količine energije i interakcija između dijelova sustava. Njome se ističu tri bitne karakteristike energije: očuvanje¹⁰, uskladištenje i prijenos, dok transformacija (pretvorba) energije ostaje nejasna.

2.4. Energija kao tvar koja može mijenjati oblik

U prirodoznanstvenoj i tehničkoj literaturi često se koristi termin 'oblici energije' iako prema prirodoznanstvenom poimanju energije postoji samo jedan oblik energije i on se zove energija. Ne postoji više oblika energije, postoje samo različiti oblici iskaza matematičkih izraza (formula) za određivanje promjena količine energije sustava zbog promjena koje se događaju u sustavima, primjerice, zbog promjene položaja, brzine i načina gibanja ili temperature dijelova sustava ili sustava u cjelini¹¹. No, energija se može uskladištiti u različitim spremnicima i prenositi između spremnika s pomoću različitih fizikalnih mehanizama (načina), pa je pojmovno jednostavnije to i terminološki razlikovati uvođenjem pojma oblika energije. U tom se smislu svi oblici energije koji se odnose na sustav mogu razvrstati u dvije skupine: nagomilanu

¹⁰ Pojam očuvanja energije vrlo je čest i u laičkom poimanju energije, gdje ima drugačije značenje od prirodoznanstvenog pojma očuvanja energije. Za laika očuvanje energije prvenstveno znači štednju energije i smanjenje nekorisno potrošene energije, pri čemu se energija shvaća kao resurs. Prema tom shvaćanju, utemeljenom na svakodnevnom iskustvu, potrošena energija je zauvijek izgubljena. Zanimljivo je da se ta tvrdnja može uskladiti s drugim stavkom termodinamike ako se pod izgubljenom energijom smatra onaj dio energije koji se ne može radom prenijeti iz jednog sustava u drugi. U tom smislu, drugi stavak termodinamike podržava laičko poimanje energije, tj. da se izgubljena energija ne može više upotrijebiti, dok prvi stavak termodinamike (zakon o očuvanju energije) podržava prirodoznanstveno poimanje energije, tj. da izgubljena energija nije nestala.

¹¹ Razlikovanje oblika energije potječe još iz XIX. stoljeća. Tada su se usporedno, ali uglavnom nezavisno jedna od drugih, razvijala područja fizike (mekanika, elektricitet i magnetizam, termodinamika i dr.) kao i kemija i biologija i pronalazili matematički izrazi za određivanje promjena količine energije u sustavima zbog promjene parametara sustava ili vanjskih parametara koji opisuju sustav. Prema tadašnjem shvaćanju, svaki od tih matematičkih izraza definirao je različiti oblik energije. Tek nakon što je James Joule oko 1845. godine pronašao eksperimentalnu metodu za određivanje mehaničkog ekvivalenta toplinskoj energiji i zaključio da toplina nije tvar nego vrsta gibanja, postupno je postajalo sve jasnije da je energija jedinstvena fizikalna veličina koja povezuje različita područja fizike, kao i fiziku s kemijom i biologijom. No, podjela na oblike energije ostala je do danas.

(usklađenu) energiju sustava (engl. *existence form*) i prijelaznu energiju sustava (engl. *exchange form*) [12].

U usklađenu energiju sustava ubrajaju se kinetička energija, potencijalna energija i unutrašnja energija sustava, čiji zbroj daje ukupnu energiju sustava. U prijelaznu energiju sustava ubrajaju se energija prenesena toplotom i energija prenesena radom [8, str. 227]. Toplota je proces kojim se energija spontano prenosi preko granice sustava zbog temperaturne razlike između sustava i okoline¹². Taj proces prati uvijek proizvodnja entropije. Rad je proces kojim se energija prenosi preko granice sustava zbog promjene vanjskih parametara koji opisuju taj sustav. Ti parametri mogu biti, npr. volumen, električno polje, magnetsko polje, gravitacijski potencijal. Tijekom rada ne proizvodi se entropija. Osnovne vrste rada su: mehanički rad, električni prijenos¹³, elektromagnetsko zračenje¹⁴, prijenos tvari i prijenos mehaničkim valovima [14, str. 213]¹⁵.

Osim te podjele, koja logički proizlazi iz zakona o lokalnom očuvanju energije¹⁶, česta je u literaturi podjela oblika energije prema prirodnoznatvenim i tehničkim područjima. Prema toj podjeli razlikuju se mehanička energija, toplanska energija, električna energija, kemijska energija i nuklearna energija. No, o opsegu tih termina ne postoji opća suglasnost u prirodnoznatvenoj i tehničkoj zajednici. Primjerice, toplanska energija jednaka je kinetičkoj energiji zbog nasumičnog translacijskog, rotacijskog i oscilatornog gibanja molekula sustava za jedne a za druge jednaka je toploti. Isto tako se pod mehaničkom energijom često smatra zbroj kinetičke energije i gravitacijske potencijalne energije ili zbroj kinetičke energije i elastične potencijalne energije a katkad i zbroj svih triju oblika energije.

Konceptualna metafora o energiji kao tvari koja može mijenjati oblik prikladna je za opis jedne od bitnih karakteristika energije – transformacije (pretvorbe) energije – tj. promjene jednog oblika energije u drugi oblik unutar

¹² Toplota je proces, ali se pod njom često razumijeva i količina energije prenesena tim procesom.

¹³ Električni prijenos je proces u kojem se energija prenosi preko granice sustava zbog posmičnog gibanja električno nabijenih čestica (naboja) u vodljivom sredstvu, tj. električne struje. U elektrotehnici se uobičajeno zove električna energija.

¹⁴ Elektromagnetsko zračenje je proces u kojem se energija prenosi preko granice sustava zbog ubrzanog gibanja električno nabijenih čestica (naboja).

¹⁵ Uočimo da osnovni pojmovi podjele 'usklađena energija' i 'prijelazna energija', unatoč iste strukture naziva, pripadaju različitim pojmovnim kategorijama. Usklađena energija pripada kategoriji stanja, dok prijelazna energija pripada kategoriji procesa. Postojanje različitih pojmovnih kategorija unutar osnovnog pojma energije može predstavljati ozbiljnu poteškoću pri učenju i razumijevanju pojma energije [2]. U elektrotehnici dodatnu pomutnju unosi naziv 'električna energija', umjesto kojeg bi mnogo bolji naziv bio 'energija električnog prijenosa' uobičajen u fizici [5].

¹⁶ Zakon o lokalnom očuvanju energije može se izreći i ovako: Svako smanjenje ili povećanje količine usklađene energije sustava u svakom je trenutku uravnoteženo istodobnim povećanjem ili smanjenjem količine prijelazne energije sustava.

sustava ili na granici sustava. Također, ta metafora omogućuje da se sustav ili dijelovi većeg sustava promatraju kao „crne kutije“. No, uvođenjem pojma oblika energije odvlači se pozornost od fizičkih promjena u sustavima koje se događaju tijekom prijenosa energije u dijelovima sustava tako da fizikalni mehanizmi prijenosa ostaju nerasvijetljeni. Tako je, primjerice, za opis slobodnog pada, u skladu s tom metaforom, dovoljno reći da se tijekom slobodnog pada događa transformacija potencijalne energije u kinetičku energiju, dok fizikalni mehanizam – djelovanje gravitacijskog polja – ostaje „skriven“ u crnoj kutiji.

2.5. Energija kao tvar koja može strujati

Konceptualna metafora o energiji kao tvari koja struji (teče) i pripadni metaforični izraz 'tok (strujanje) energije' često se koriste kada se razmatra prijenos energije između sustava i okoline, posebno ako je taj prijenos kontinuiran i jednolik. Tako se uobičajeno govori o toku topline (toplinskom toku), toku naboja (električnoj struji) i toku elektromagnetskog zračenja, dok se taj metaforični izraz praktički ne upotrebljava za mehanički rad, prijenos tvari i prijenos mehaničkim valovima.

Za razliku od prethodne konceptualne metafore gdje energija poprima različite oblike kao rezultat gibanja i međudjelovanja dijelova sustava ili sustava u cjelini, opis prijenosa energije kao tvari koja struji dijelovima sustava, tj. neke vrste fluida, i prolazi granicom sustava nepromijenjenog „sastava“ odgovara prirodnoznanstvenom poimanju da postoji samo jedan oblik energije. Također, ako energija struji u sustav, ona je morala odnekud doći, što upućuje na postojanje izvora energije. Isto tako, ako energija struji iz sustava, ona je morala biti prethodno uskladištena u sustavu bilo kao trajni ili privremeni izvor energije ili je dotekla u sustav iz nekog izvora energije izvan sustava.

Na metafori o energiji kao tvari koja struji temelji se i definicija snage sustava, prema kojoj je snaga sustava jednaka količini energije koja u jedinici vremena prođe (prostruji) kroz graničnu plohu sustava okomito na smjer protjecanja. Naziv 'snaga' nije dobro odabran, ali je kratak i prihvaćen je od prirodnoznanstvene i tehničke zajednice. U skladu s definicijom tog pojma bolji bi naziv bio 'jakost toka (struje) energije'¹⁷.

¹⁷ U inženjerskoj praksi, pogotovo pri projektiranju uređaja, snaga je kudikamo važniji pojam od energije jer je ona odlučujući faktor pri dimenzioniranju naprava uređaja. Primjerice, iz podatka da se u nekom otporniku 50 Ws električne energije transformiralo u toplinu, projektant ne može ništa zaključiti o potrebnoj izvedbi otpornika i njegovim fizičkim dimenzijama. Nasuprot tomu, podatak da je snaga otpornika, tj. jakost toka energije kroz otpornik, 50 W jasan je orijentir projektantu za ispravno dimenzioniranje otpornika.

2.6. Energija kao tvar koja može biti nošena

Konceptualna metafora o energiji kao tvari koja može biti nošena implicira postojanje fizičkog nosača energije – tvari – čiji se put, smjer i brzina gibanja podudaraju s putom, smjerom i brzinom „putovanja“ energije. Ta je metafora posebno prikladna kada se opisuje prijenos energije prijenosom tvari. Karakteristični primjeri su punjenje spremnika automobila gorivom čime je omogućena transformacija potencijalne energije sustava gorivo – kisik u druge oblike energije te konvekcija kao jedan od načina prijenosa energije topline.

Konceptualna metafora o energiji kao tvari koja može biti nošena često se upotrebljava i kada se jezikom „oblika energije“ i pojmom transformacije pokušavaju obuhvatiti i ostali oblici prijelazne energije sustava. Taj je pokušaj motiviran iskustvenom činjenicom da energija nikad ne struji sama nego uvijek istodobno s barem još jednom kvazimaterijalnom fizikalnom veličinom, koja se tada shvaća kao nosač energije [3].

U tom se slučaju transformacija energije interpretira kao proces u kojem je energija prenesena od jednog nosača na drugi. I ta metafora podržava prirodnoznanstveno poimanje da ne postoji više oblika energije. Energija tijekom transformacije ne mijenja oblik, ona mijenja nosač. Prema tom nosaču energiji se pridjeljuje odgovarajući atribut. Tako, kad energija struji zajedno s električno nabijenim česticama (električnim nabojem) naziva se u elektrotehnici električna energija, kad struji zajedno s entropijom naziva se toplota, kad struji zajedno s količinom gibanja ili momentom količine gibanja naziva se mehanički rad a kad tijekom kemijske reakcije struji zajedno s količinom tvari naziva se kemijska energija. Količina prenesene energije ovisi ne samo o jakosti struje električnog naboja (električne struje), struje entropije, struje količine gibanja/momenta količine gibanja odnosno struje materije nego i o vrijednosti električnog potencijala, apsolutne temperature, brzine gibanja odnosno kemijskog potencijala.

Očigledno, naziv ‘nosač energije’ ne treba shvatiti doslovno. Njime se samo ističe istodobnost pojave struje energije i struje nosača energije. Ne implicira se da energija i njezin nosač zauzimaju isti dio prostora ili da struje istom brzinom ili u istom smjeru. Tako je, primjerice, vodič struje električne energije dielektrik, tj. nevodnički struje električnog naboja, dok je nevodnički struje električne energije vodič struje električnog naboja, što znači da električni naboj struji vodičem dok energija struji prostorom oko vodiča. Također, brzina strujanja električne energije odgovara približno brzini svjetlosti, dok je brzina posmičnog gibanja električnog naboja manja za deset i više ‘redova vrijednosti’¹⁸.

¹⁸ Izrazom ‘posmično gibanje’ ističe se da zbog djelovanja električnog polja u vodiču postoji neto statističko gibanje nosača energije, tj. gibanje električnog naboja – elektrona – kroz bilo koji presjek vodiča. To je gibanje superponirano na nasumično gibanje elektrona u vodiču koje postoji i ako ne

2.7. Energija kao tvar koja se može uskladištiti

Energija promatrana kao tvar može se uskladištiti u nekom spremniku. Taj je spremnik, prirodnoznanstveno gledano, uvijek neki (fizički) sustav. Time se neraskidivo povezuje energija i sustav. Nema smisla govoriti da je energija uskladištena, oslobođena ili da se dobiva ili gubi ako se ne navede sustav ili sustavi na koje se to odnosi. To znači da kad se govori o uskladištenoj energiji ima smisla govoriti samo o uskladištenoj energiji sustava. To se često zaboravlja, posebno kada je riječ o potencijalnoj energiji. Potencijalna energija je povezana s radom sila polja između fizičkih objekata, što znači da se ne može govoriti, kao što se to često čini, o potencijalnoj energiji nekog pojedinačnog objekta, nego samo o potencijalnoj energiji sustava kojeg čine barem dva objekta.

Konceptualna metafora o energiji kao tvari koja se može uskladištiti u nekom sustavu i koja se kasnije radom i/ili topline može prenijeti u druge sustave ključna je metafora u poimanju izvora energije. Formalno gledano, svaki sustav u kojem se smanjila količina uskladištene energije, što je rezultiralo povećanjem količine energije u drugom sustavu može se smatrati izvorom energije za taj drugi sustav. U praksi, pod izvorom energije razumijeva se sustav ili dio sustava u kojem je uskladištena količina energije dovoljna za potrebe sustava u koji se ta energija prenosi.

Određivanje sustava ili dijela sustava koji djeluje kao izvor energije nije uvijek očigledno. Tako se često, čak i u stručnoj literaturi, kao primjeri izvora energije navode gorivo i hrana. Tvrdi se da se uskladištena energija u gorivu i hrani oslobađa tijekom izgaranja goriva odnosno metabolizacije hrane. Činjenica je, međutim, da se energija npr. u gorivu oslobađa tijekom izgaranja isključivo zbog zajedničkog djelovanja goriva i kisika, pa bi se s jednakim pravom moglo reći i da je izvor energije kisik iz zraka! Isto vrijedi i za većinu metaboličkih procesa. Pravi izvor energije u tim je primjerima sustav gorivo – kisik tijekom izgaranja odnosno sustav hrana – kisik tijekom metabolizacije.

U tehnici, ekonomiji, politici i u svakodnevnom govoru često se upotrebljava pojam 'obnovljivi izvori energije'. Taj pojam shvaćen doslovno u suprotnosti je sa zakonom o očuvanju energije, tj. tvrdnjom da se energija ne može niti stvoriti niti uništiti. Pridjevom 'obnovljivi' želi se istaći da su na Zemlji ograničene količine, za ljude upotrebne uskladištene energije, koje se upotrebom smanjuju i transformiraju u za ljude neupotrebne oblike energije. Zbog toga treba pridobivati energiju iz, promatrano iz ljudske perspektive, neograničenih izvora energije, kao što su to energija elektromagnetskog zračenja Sunca, unutrašnja energija Zemlje i dr.

postoji električno polje. Jakost struje električnog naboja (električna struja), mjerena u amperima, fizikalna je veličina kojom se kvantificira to neto statističko gibanje električnog naboja.

Zaključna razmatranja

U klasičnoj fizici i tehnici energija je apstraktan pojam; fizikalna veličina čija se bit iskazuje u zakonu o lokalnom očuvanju energije te većem broju matematičkih izraza koji omogućuju kvantitativnu analizu različitih pojava u fizičkim sustavima¹⁹. Prirodnoznanstveni pojam energije je primitivni pojam fizikalnih teorija i pravo se razumijevanje energije postiže tek njezinom uspješnom primjenom u različitim kontekstima i u zajednici s drugim pojmovima, kao što su npr. sila, rad ili toplina. Zbog toga energija nije lako razumljiv pojam te učenje o energiji predstavlja veliki izazov ne samo za one koji o njoj uče, nego i za one koji ih uče.

Prirodna je sklonost ljudskog uma da apstraktne ideje i pojmove svede na konkretne, bliske svakodnevnom iskustvu, što znači da je ljudski pojmovni sustav u osnovi metaforičan. Zbog toga je, posebno u početnoj fazi učenja o energiji, praktički neizbježna upotreba metaforičnih riječi i jezičnih izraza. *Energija je tvar* – osnovna je konceptualna metafora za energiju i temelj je kvazimaterijalnog poimanja energije.

Uspješnost te konceptualne metafore leži u činjenici da je kvazimaterijalni pojam energije u velikoj mjeri sukladan prirodnoznanstvenom pojmu energije. Pri tome je bitno znati u kojim se slučajevima kvazimaterijalni pojam energije razlikuje od prirodnoznanstvenog i jesu li te razlike i pod kojim uvjetima uklonjive. Navedimo tri osnovne razlike.

Prva razlika odnosi se na put, smjer i brzinu prijenosa energije. Konceptualna metafora o energiji kao tvari koja može biti nošena prikladna je za opis prijenosa energije prijenosom tvari. Nasuprot tomu, u važnim primjerima za praksu, prijenosu energije u istosmjernim električkim mrežama, fizički nosač energije (elektroni) putuje vodičima a energija okolnim prostorom i to različitim brzinama, dok u prijenosu energije u izmjeničnim električkim mrežama elektroni ostaju približno na istim mjestima u vodičima i vibriraju u ritmu frekvencije izmjenične mreže. Dobar je i primjer remenskog ili lančanog prijenosa kinetičke energije. Fizički nosač energije (zatezni dio remena ili lanca) giba se u smjeru suprotnom od smjera toka energije, pri čemu je brzina kojom se energija prenosi mnogo veća od brzine kojom se giba remen ili lanac. U navedenim je primjerima razlika između kvazimaterijalnog i prirodnoznanstvenog pojma energije neuklonjiva.

Druga razlika proizlazi iz činjenice što kinetička i potencijalna energija nekog sustava nisu u klasičnoj fizici intrinzična svojstva sustava, dok tvar (masa

¹⁹ U modernoj fizici (opća teorija relativnosti i kvantna fizika) i sam pojam energije kako ga vidi klasična fizika podvrgnut je temeljitoj reviziji, a od kvazimaterijalnog pojma energije kao i od bilo kakvih zornih predodžaba temeljenih na svakodnevnom iskustvu treba odustati.

sustava) s kojom se u osnovnoj konceptualnoj metafori energija poistovjećuje, to jest. Dodatno, potencijalna energija sustava može biti i negativnih vrijednosti, što je za materijalne entitete apsurdno. No tu je razliku između kvazimaterijalnog i prirodoznanstvenog pojma energije lako ukloniti ako se sve analize pojava u sustavu provedu u fiksnom referentnom sustavu promatrača.

Treća razlika proizlazi iz činjenice što, prirodoznanstveno gledano, energija postoji u samo jednom obliku, dok energija, kvazimaterijalno gledano, prema nekim konceptualnim metaforama izvedenim iz osnovne konceptualne metafore postoji u više oblika i transformira se tijekom prijenosa iz jednog oblika u drugi. Tu je razliku načelno lako ukloniti ako se jezik „oblika energije“ shvati samo kao pogodan način za terminološko razlikovanje između različitih matematičkih izraza prema kojima se računa količina energije.

Proizlazi da, uzimajući u obzir navedene razlike, kvazimaterijalno poimanje energije omogućuje objašnjenje prirodoznanstvenog pojma energije na konkretan i zoran način. Pri tome je ključno naglasiti da se ni u jednom trenutku ne smije smetnuti s uma da su u tom procesu objašnjenja značenja riječi i jezičnih izraza iz izvorne konkretne domene (tvari) metaforički proširena na ciljnu apstraktnu domenu (energiju). To je posebno važno u prvim susretima s prirodoznanstvenim pojmom energije u školskom sustavu kada učenik ili student treba mijenjati prethodno, obično duboko ukorijenjeno u svakodnevnom iskustvu, laičko poimanje energije u prirodoznanstveno poimanje energije. Ne shvati li učenik ili student metaforičko proširenje značenja riječi i jezičnih izraza kojima se opisuju karakteristike energije, on ne samo da ne će znati što je energija, nego će svoje doslovno objašnjenje tog pojma „odjenuti“ u znanstveni ili tehnički žargon koji je tijekom školovanja usvojio, stvarajući time pogrešan utisak da je nešto naučio.

Literatura

- [1] Amin, G. T., Conceptual metaphor meets conceptual change, *Human Development*, 52 (3), May 2009., pp. 165 – 197
- [2] Chi, M. T. H., Three types of conceptual change: Belief revision, mental model transformation, and categorical shift. *Handbook of research on conceptual change*, Hillsdale, NJ: Erlbaum, 2008, pp. 61 – 82
- [3] Falk, G., Herrmann, F., Schmid, G. B., Energy forms or energy carriers?, *American Journal of Physics*, 51 (12), December 1983, pp. 1074 – 1077
- [4] Feynman, R. P., Leighton, R. B., Sands, M., *The Feynman lectures on physics*, Vol. I., Vol. II., Addison – Wesley, Reading, Massachusetts, 1966.
- [5] Flegar, I., O električnoj energiji, *Povijest i filozofija tehnike*, Kiklos – Krug knjige, Zagreb, 2020., str. 169 – 191
- [6] Hecht, E., Understanding energy as a subtle concept: A model for teaching and learning, *American Journal of Physics*, 87, (7), July 2019, pp. 495 – 503

- [7] Jewett, J. W., Energy and the confused student IV: A global approach to energy, *The Physics Teacher*, Vol. 48, April 2008, pp. 210 – 217
- [8] Kittel, Ch., Kroemer, H., *Thermal physics*, W. H. Freeman and Company, New York, 1980.
- [9] Lakoff, G., Johnson, M., The metaphorical structure of the human conceptual system, *Cognitive Science*, 4, 1980., pp. 195 – 208
- [10] Lancor, R., Using metaphor theory to examine conceptions of energy in biology, chemistry and physics, *Science&Education*, Vol. 23, no. 6, pp. 1245 – 1267, 2014.
- [11] Lange, M., *An introduction to the philosophy of physics*, Blackwell Publishing, Singapore, 2006.
- [12] Požar, H., Energija i energetika, *Tehnička enciklopedija*, Jugoslavenski leksikografski zavod, 1976., Svezak 5, str. 319 – 340
- [13] Schroeder, D. V., *An introduction to thermal physics*, Addison Wesley Longman, San Francisco, 2000.
- [14] Serway, R. A., Jewett, J. W., *Physics for scientists and engineers with modern physics*, Brooks / Cole, Boston, 2014.
- [15] Sommerfeld, A., *Electrodynamics: Lectures on theoretical physics*, Vol. III., Academic Press, New York, 1952.
- [16] – , Metafora, *Enciklopedija Leksikografskog zavoda*, Jugoslavenski leksikografski zavod, 1968., Svezak 4, str. 322

ENERGY AS A QUASI-MATERIAL QUANTITY

Abstract: Energy is one of the most important scientific concepts for describing and explaining the behaviour of physical systems. Yet the comprehension of this abstract scientific concept is not an easy task because energy is not a substance, a sensation or a phenomenon and it is neither a directly observed nor a directly measured physical quantity. The important step to the understanding of the scientific concept of energy is done when the energy is conceptualized initially as a quasi-material quantity. The basis of a quasi-material conceptualization of energy is the conceptual metaphor: *Energy is a substance*. This metaphor stems from the consideration of the law of local conservation of energy. Five conceptual metaphors derived from the basic conceptual metaphor for energy are identified: energy as a substance that can be quantified, can change form, can flow, can be carried and can be stored. Each of these conceptual metaphors highlight and obscure various characteristics of energy, but together they provide a coherent set of statements that facilitate the understanding of the scientific concept of energy.

Key words: conceptual metaphor, local conservation law of energy, quasimaterial energy concept, substance, scientific concept of energy, system energy

Ivan Flegar