

DOI: [10.46793/CIGRE37.C2.11](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.C2.11)**C2.11****DOPRINOS VEŠTAČKOG INERCIJALNOG ODZIVA VETROELEKTRANA
SISTEMSKOJ INERCIJI U PERSPEKTIVNOM ELEKTROENERGETSKOM SISTEMU
SRBIJE****CONTRIBUTION OF WIND POWER PLANTS' SYNTHETIC INERTIAL RESPONSE TO
SYSTEM INERTIA IN THE PROSPECTIVE POWER SYSTEM OF SERBIA****Milica Aščerić, Kristina Lazović, Željko Đurišić***

Kratak sadržaj: Frekvencijska stabilnost u elektroenergetskim sistemima (EES) odnosi se na sposobnost sistema da održi frekvenciju unutar dozvoljenih granica nakon poremećaja, kao što su iznenadne promene u potrošnji ili proizvodnji. Rotacione mase sinhronih generatora u hidroelektrana i termoelektranama, koje skladište kinetičku energiju, su osnovni resurs inercije u savremenom EES-u Srbije. Kada dođe do debalansa aktivnih snaga proizvodnje i potrošnje, kinetička energija zamajnih masa nadomešćuje snagu debalansa i time usporava promenu frekvencije, obezbeđujući vremenski prostor za aktivaciju resursa primarne regulacije. Međutim, proces dekarbonizacije proizvodnje električne energije dovodi do sve manjeg procentualnog učešća konvencionalnih izvora u proizvodnom miksu i naglog porasta instalisanih kapaciteta u novim obnovljivim izvorima energije (OIE). Savremeni vetroagregati se na mrežu priključuju preko pretvarača, koji frekvencijski rasprežu vetrogenerator od mreže, što ih čini neosetljivim na promenu frekvencije u sistemu. Međutim, pretvarač ima mogućnost da se uvede upravljačka petlja osetljiva na frekvenciju, tzv. koncept veštačkog inercijalnog odziva, te bi vetroagregati mogli da doprinesu inerciji sistema na račun uskladištene kinetičke energije u obrtnim masama, prvenstveno turbini i generatoru. U ovom radu se kao relevantan podatak o proceni raspoložive inercije u sistemu, definiše specifična kinetička energija kao odnos dostupne kinetičke energije u sistemu i ukupne snage proizvodnje u analiziranom satu. Ovaj pokazatelj daje realnu predstavu o kapacitetu sistema da odreaguje na poremećaj, jer praktično daje raspoloživu kinetičku energiju po MW mogućeg debalansa izazvanog ispadom proizvodnih jedinica. Kroz vrednost ovog parametra, koji je dinamičkog karaktera, je sagledan uticaj integracije perspektivnih kapaciteta OIE na promenu inercije u elektroenergetskog sistemu Srbije. U okviru rada se razmatra potencijal vetroagregata kroz pružanje inercijalne podrške u perspektivnom sistemu Srbije za dva posmatrana scenarija razvoja OIE i dve hidrološki ekstremne godine. Raspoloživa kinetička energija vetroagregata nije fiksni podatak, jer se brzina turbine menja sa promenom brzine vetra. Osim toga, unutar vetroelektrane ne rade svi vetroagregati u istoj radnoj tački, te je stoga potrebno da se za svako radno stanje zasebno proračuna kinetička energija svakog vetroagregata ponaosob, a onda i vetroelektrane kao celine.

* Milica Aščerić, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Go2Power, ascericmilica4@gmail.com
Kristina Lazović, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, kristinadz@etf.bg.ac.rs
Željko Đurišić, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, djurisic@etf.rs

Procena doprinosa kinetičke energije vetroelektrana u perspektivnom sistemu je zasnovana na analizi rada vetroelektrane Čibuk 1, kao reprezentativne za buduće kapacitete vetroelektrana u sistemu.

Ključne reči: *dekarbonizacija, vetroelektrane, inercija, kinetička energija, frekvencijska stabilnost*

Abstract: Frequency stability in power systems refers to the system's ability to maintain frequency within permissible limits following disturbances such as sudden changes in consumption or generation, or outages of generating units. The rotating masses of synchronous generators in hydropower plants and thermal power plants, which store kinetic energy, serve as the primary source of inertia in Serbia's modern power system. When a frequency disturbance occurs, these rotating masses slow down the frequency deviation, providing a time buffer for the activation of primary frequency control resources. However, the decarbonization of electricity generation is leading to a decreasing share of conventional sources in the generation mix and a rapid increase in the installed capacity of new renewable energy sources (RES). Modern wind turbines are connected to the grid via power converters, which decouple the generator from the grid frequency, making them insensitive to frequency changes in the system. However, a frequency-sensitive control loop can be implemented in the converter—known as the synthetic inertial response concept—allowing wind turbines to contribute to system inertia by utilizing the kinetic energy stored in their rotating masses, primarily in the turbine and generator. In this study, specific kinetic energy is defined as a relevant metric for assessing available system inertia. It represents the ratio of available kinetic energy in the system to the total generation power during the analyzed hour. This indicator provides a realistic representation of the system's ability to respond to disturbances, as it effectively quantifies the available kinetic energy per megawatt of potential imbalance caused by generating unit outages. By analyzing the dynamic changes in this parameter, the impact of integrating future RES capacities on system inertia is examined. The study also evaluates the potential of wind turbines to provide inertial support in Serbia's prospective power system under two RES development scenarios and two hydrologically extreme years. The available kinetic energy of wind turbines is not a fixed value, as turbine speed varies with wind speed fluctuations. Additionally, not all wind turbines within a wind farm operate at the same operating point, making it necessary to calculate the kinetic energy of each wind turbine individually for each operating state, followed by an assessment at the wind farm level. The estimation of wind farms' kinetic energy contribution in the prospective system is based on an analysis of the Čibuk 1 wind farm, considered representative of future wind power capacities in the system.

Key words: *decarbonization, wind power plants, inertia, kinetic energy, frequency stability*

1 UVOD

Briga za zaštitu životne sredine, kao i razvoj tehnologija vetroenergetskih i fotonaponskih sistema, podstakle su integraciju obnovljivih izvora energije (OIE) i sa druge strane ubrzale povlačenje elektrana na fosilna goriva. Ovakva energetska tranzicija dovela je do značajnih promena u dinamičkim karakteristikama elektroenergetskih sistema (EES), pri čemu je frekvencijska stabilnost prepoznata kao jedan od ključnih izazova u kontekstu održivosti dekarbonizovanih EES-a [1].

Proizvodne jedinice zasnovane na OIE su u najvećem broju slučajeva povezane na mrežu preko energetskih pretvarača, i tako su raspregnute od mrežne dinamike i neosetljive na promenu frekvencije. Kao posledica toga, ukupna inercija sistema se smanjuje, što rezultira pogoršanim frekvencijskim odzivom. Kratkoročno rešenje za ovaj problem je podsticanje rada elektrana sa smanjenim opterećenjem, davanje prioriteta blokovima sa većom inercijom ili ograničavanje udela OIE koji su povezani na mrežu putem pretvarača. Dugoročno posmatrajući, potrebno je da novi obnovljivi izvori energije doprinesu sigurnosti snabdevanja i frekvencijskoj stabilnosti. Fotonaponske elektrane (bez baterijskog skladištenja energije) ne mogu pružati inercijalnu podršku sistemu jer nemaju uskladištenu energiju u svojim instalacijama koja bi mogla biti injektirana u sistem. Relativno mala elektrostatička energija, koja je uskladištena u kondenzatorima u invertorskim elementima, ne može biti iskorišćena jer bi njeno korišćenje brzo dovelo do kolapsa napona na DC linku pretvarača i isključenja fotonaponske elektrane sa mreže. Uključivanje vetroelektrana u sisteme regulacije frekvencije i aktivnih snaga je prepoznato kao moguće rešenje, s obzirom na potencijal kinetičke energije uskladištene u obrtnim masama vetroagregata, [2]. Emulacija inercije, poznata i kao sintetička ili virtuelna inercija, koristi energetske pretvarače i napredne kontrolne algoritme kako bi se oponašao prirodni inercijalni odziv sinhronih generatora. Za razliku od fotonaponskih elektrana, kinetička energija u zamajnim masama vetroagregata može održati napon na DC kolu pretvarača pri injektiranju aktivne snage od strane mrežnog konvertora u procesu emulacije inercije i time pružiti održiv inercijalan odziv koji neće dovesti do kolapsa napona u DC kolu pretvarača i isključenja vetroagregata. Trenutno, neki operatori prenosnog sistema već zahtevaju od vetroelektrana pružanje inercijalnog odziva, kao što je slučaj u Kini i Kanadi, dok je u pojedinim zemljama, poput Španije, to još uvek na dobrovoljnoj osnovi [3]. U okviru evropske interkonekcije, u ovom trenutku se radi isključivo na definisanju minimalnog nivoa sistemske inercije [4].

U radu [5] je izvršena procena smanjenja inercione konstante u sistemu Srbije za dva moguća pravca razvoja OIE do 2030, konzervativni i maksimalistički, kao i za trenutno stanje. Pregled instalisanih kapaciteta OIE za svaki od 3 slučajeva je dat u Tabeli I. Pokazano je da srednja godišnja sistemska inerciona konstanta može da se smanji i za više od 0,5 s ukoliko bi se izgradili novi planirani kapaciteti elektrana na OIE.

Tabela I: Instalisani kapaciteti OIE priključeni na prenosni sistem u razmatranim scenarijima

	Referentno stanje (31.12.2023.)	Konzervativni scenario 2030. god	Maksimalistički scenario 2030. god
Vetroelektrane	374	3200	7100
Solarne elektrane	0	2000	3500
Ukupno	374	5200	10600

Ovaj rad razmatra uključivanje perspektivnih vetroelektrana u regulaciju frekvencije u istim scenarijima, sa ciljem da se utvrdi njihov mogući doprinos očuvanju sistemske inercije, kao bitnog kvantifikatora frekvencijske stabilnosti. Analize pretpostavljaju da će svi novopriključeni vetroagregati imati mogućnost pružanja inercijalnog odziva, a rad vetroelektrane Čibuk 1 se smatra reprezentativnim za procenu rada svih perspektivnih vetroelektrana. Rad je organizovan na sledeći način: u Poglavlju 2 dat je pregled veličina koje opisuju nivo sistemske inercije i uvedena je nova veličina, specifična kinetička energija, koja će se koristiti u analizama za karakterizaciju kapaciteta EES-a u pogledu inercijalne podrške sistemu pri poremećajima debalansa aktivnih snaga proizvodnje i potrošnje. Poglavlje 3 prikazuje analizu ostvarenog rada vetroelektrane Čibuk 1 i daje procenu ukupne kinetičke energije koju će posedovati perspektivne vetroelektrane u sistemu Srbije.

U Poglavlju 4 predstavljeni su rezultati uključivanja perspektivnih vetroelektrana u regulaciju frekvencije, sa aspekta sistemske inercije. Na kraju, u Poglavlju 5 izneti su zaključci sprovedenih analiza.

2 DEFINICIJA INERCIJE SISTEMA

Inercija sistema se može definisati kao količina uskladištene kinetičke energije u direktno povezanim sinhronim agregatima koje pružaju otpor bilo kakvoj promeni frekvencije u analiziranom EES-u [6]. Kinetička energija uskladištena u sinhronim hidro i termo agregatima u konvencionalnim elektranama se može izraziti preko konstante inercije generatora (H_{SG}), koja predstavlja vreme tokom kojeg generator može obezbeđivati aktivnu snagu koja odgovara naznačenoj prividnoj snazi generatora samo na račun uskladištene kinetičke energije u njegovim zamajnim masama:

$$H_{SG} = \frac{J_{SG} \cdot \omega_n^2}{2 \cdot S_{nom}} \quad (1)$$

gde su: J_{SG} - momenat inercije agregata, ω_n - naznačena mehanička brzina obrtanja turbine i S_{nom} naznačena prividna snaga agregata.

Ukupna kinetička energija sistema tradicionalno se izražava kao suma proizvoda konstante inercije i naznačene snage sinhronih jedinica direktno povezanih na mrežu [7]:

$$E_{sys} = \sum_{n=1}^{N_{sg}} H_{SG,n} \cdot S_{nom,n} \quad (2)$$

Uobičajeno je da se ukupna kinetička energija sistema kvantifikuje preko inercione konstante sistema (H_{sys}), koja može da se koristi i za poređenje inercije sistema različitih veličina. U literaturi se može naći nekoliko formulacija za izračunavanje H_{sys} . Prema [8], ona predstavlja odnos ukupne kinetičke energije sistema i naznačene snage angažovanih proizvodnih jedinica, što je dato izrazom:

$$H_{sys} = \frac{\sum_{n=1}^{N_{sg}} H_{SG,n} \cdot S_{nom,n}}{\sum_{n=1}^{N_{sg}} S_{nom,n}}, \quad (3)$$

gde se navedene veličine odnose na angažovane proizvodne jedinice, tj. na one koje su sinhronizovane na mrežu, njih N_{sg} . Konstanta inercije sistema se izražava u sekundama i varijabilna je veličina, jer zavisi od broja i tipa mašina povezanih na mrežu, shodno planu angažovanja proizvodnih jedinica. Ono što je bitno uočiti je da konstanta inercije sistema, prema definiciji (3), ne zavisi od radnog režima agregata, odnosno on poseduju istu kinetičku energiju kada agregati rade u praznom hodu i kada su opterećeni. Ovakva definicija ima opravdanje u sistemima sa konvencionalnim agregatima, s obzirom na to da kinetička energija zamajnih masa ne zavisi od radnog režima generatora jer se njegove zamajne mase u stacionarnom režimu uvek obrću sinhronom brzinom nezavisno od generisanja aktivne i reaktivne snage.

Dostupna kinetička energija se često prikazuje u odnosu na proizvodnju jedinica u sistemu. U radu [9], Međunarodna agencija za energetiku (eng. *International Energy Agency*) procenjuje prosečnu konstantu inercije sistema, uzimajući u obzir prosečnu godišnju proizvodnju električne energije. Sa druge strane, u radu [8] je definisana konstanta inercije sistema u odnosu na ukupnu godišnju proizvodnju električne energije prema jednačini (4):

$$H_{eq} = \frac{\sum_{n=1}^{N_{sg}} H_{SG,n} \cdot E_{g,n}}{E_{g,total}} \quad (4)$$

gde su $E_{g,n}$ – ukupna godišnja proizvodnja i -tog generatora, a $E_{g,total}$ ukupna godišnja proizvodnja sistema.

U ovoj analizi, kao relevantan podatak o proceni inercije, definiše se specifična kinetička energija $E_{K,sp}$, kao odnos dostupne kinetičke energije i ukupne proizvodnje u analiziranom satu:

$$E_{K,sp,i} = \frac{\sum_{k=1}^{N_i} H_k \cdot S_{nom,k}}{\sum_{k=1}^{N_i} P_k} \quad (5)$$

gde je $\sum_{k=1}^{N_i} P_k$ suma proizvodnje aktivne snage svih angažovanih jedinica (ukupno N_i) u analiziranom satu i u analiziranom EES-u.

Pokazatelj $E_{K,sp,i}$ zavisi od radnog režima svih sinhronizovanih agregata, odnosno raspoloživa kinetička energija sistema je izražena u odnosu na proizveden MW sistema. Opravdanost ovakvog pristupa leži u činjenici da OIE uzimaju značajan udeo u ukupnoj proizvodnji u sistemu. Parametar $E_{K,sp,i}$ fokus stavlja na angažovanost nekonvencionalnih agregata. Što znači da pri maksimalnoj promeni snage elektrana na OIE, od minimalne do instalisane, konstanta inercije sistema ostaje nepromenjena dok će parametar specifične kinetičke energije uzimati različite vrednosti u skladu sa promenom proizvodnje nekonvencionalnih izvora, koji ne doprinose inerciji. Deljenjem ukupne kinetičke energije sa ukupnom trenutnom snagom proizvodnje se dobija realnija predstava o mogućnosti sistema da odreaguje na poremećaj. Opravdanost uvođenja ove veličine, kao mere kapaciteta sistema za inercijalni odziv usled poremećaja frekvencije pri debalansu snaga proizvodnje i potrošnje, leži u činjenici da ona daje predstavu o potencijalu sistema za pružanje inercijalnog odziva po MW proizvodnje u analiziranom EES-u nezavisno da li ovaj proizvedeni MW dolazi od OIE ili konvencionalnih elektrana. Inerciona konstanta, koja je formalno matematički predstavljena relacijom (3), ne može oslikati stvarni kapacitet sistema u pogledu inercijalnog odziva. Na primer, ako bi u analiziranom EES-u bila priključena fotonaponska elektrana snage 300 MW, to bi shodno relaciji (3) umanjilo konstantu inercije sistema jer je ova elektrana vidljiva sa svojom odobrenom snagom samo u imeniocu u relaciji (3). Međutim, ova definicija ne uzima u obzir da li elektrana radi sa punom snagom (kada je jaka insolacija), i time bitno doprinosi balansu snaga u sistemu, ili je u režimu minimalne proizvodnje (na primer oblačno vreme) kada je sinhronizovana na mrežu ali praktično ne doprinosi bilansu snaga u sistemu. Ispad solarne elektrane pri sunčanom danu u podnevnim satima uzrokuje značajan debalans u sistemu, dok će ispad iste ove elektrane pri oblačnom danu uzrokovati beznačajan debalans aktivnih snaga. U ovom leži važnost definisanja specifične kinetičke energije, relacija (5), koja prepoznaje i veličinu potencijalnog debalansa snaga u sistemu i potencijal za njegovu kompenzaciju kroz inercijalni odziv. Kapacitet sistema u pogledu inercijalnog odziva je od suštinske važnosti za stabilnost sistema. U skladu sa zakonom o održanju energije, bilans snaga proizvodnje i potrošnje mora biti održan u svakom trenutku. Neposredno nakon poremećaja balansa snaga proizvodnje i potrošnje, na primer ispada velikih proizvodnih jedinica, regulacija primarnog energenta kroz dejstvo turbinskih regulatora u elektranama koje su priključene na sistem nema dovoljnu brzinu da može uspostaviti balans između snaga proizvodnje i potrošnje. U tom kritičnom periodu snaga debalansa se nadomešćuje na račun smanjenja kinetičke energije zamajnih masa u sistemu. Ona se spontano odvija kod obrtnih električnih mašina koje su direktno priključene na mrežu, dok se kod mašina koje su priključene na mrežu preko pretvarača, kao što su vetrogeneratori, ova energija injektira kroz emulaciju inercijalnog odziva.

Inercijalni odziv je od ključnog značaja za stabilnost sistema jer od njega zavisi brzina propada frekvencije. Inercijalni odziv daje potrebno vreme za aktivaciju primarne regulacije i uspostavljanje balansa snaga proizvodnje iz primarnog energenta i potrošnje u sistemu, kada dolazi do stabilizacije frekvencije čime se inercijalni odziv sistema završava, a normalizaciju frekvencije u sistemu preuzimaju sistemi primarne, sekundarne i tercijerne regulacije.

Vetroagregati su neosetljivi na poremećaje frekvencije u sistemu zbog njihovog načina povezivanja na mrežu. Oni ne pružaju spontanu inercijalnu podršku pri promeni frekvencije i ne doprinose kinetičkoj energiji sistema. Mogućnost emulacije inercije kroz upravljanje pretvaračem čini da je moguće iskoristiti kinetičku energiju uskladištenu u obrtnim masama vetroagregata, koja bi se u slučaju poremećaja mogla plasirati u sistem, na račun smanjenja brzine obrtanja.

Kinetička energija jednog vetroagregata zavisi od kvadrata brzine obrtanja turbine, ω , i momenta inercije obrtnih masa, J . Kod modernih vetroagregata, brzina obrtanja se menja u skladu sa brzinom vetra kada je ova manja od nominalne brzine vetra, a pri brzinama vetra većim od nominalne, vetroturbina se obrće nominalnom brzinom. Procena brzine obrtanja turbine biće izvršena uz pretpostavke da se u opsegu brzina vetra od brzine uključenja do nominalne brzine, ona linearno menja sa izlaznom snagom, što je u skladu sa strategijom maksimalnog stepena iskorišćenja vetroturbine. Pri brzinama vetra većim od nominalne, vetroagregat prelazi na strategiju konstantne brzine obrtanja, kada se vetroturbina obrće sa maksimalnom brzinom (ω_{max}), što je definisano sledećim relacijama:

$$\omega(v) = \begin{cases} \omega_{min} + (\omega_{max} - \omega_{min}) \frac{v - v_{cut-in}}{v_{nom} - v_{cut-in}}, & v_{cut-in} < v < v_{nom} \\ \omega_{max}, & v_{nom} < v < v_{cut-out} \end{cases} \quad (6)$$

gde su: ω_{min} i ω_{max} minimalna i maksimalna radna brzina obrtanja vetroturbine, respektivno, a v_{cut-in} , v_{nom} i $v_{cut-out}$ su brzina uključenja, nominalna, i brzina isključenja.

Kinetička energija uskladištena u zamajnim masama m -tog vetroagregata se može izračunati na sledeći način:

$$E_{m,i}(v) = \frac{1}{2} J(\omega_i(v))^2 = H_m \cdot S_{nom,m} \cdot \left(\frac{\omega_i(v)}{\omega_{max}} \right)^2 = H_{ve,m,i} \cdot S_{nom,m} \quad (7)$$

gde su $H_{ve,m,i}$ i $S_{nom,m}$ konstanta inercije u i -tom satu i nominalna prividna snaga vetroagregata, respektivno.

Konačno, ukupna kinetička energija na nivou vetroelektrane se dobija kao:

$$E_{VE,i} = \sum_{m=1}^{N_{va,i}} E_{m,i}(v) \quad (8)$$

gde je $N_{va,i}$ broj sinhronizovanih vetroagregata u i -tom satnom intervalu.

Raspoloživa kinetička energija vetroturbine nije fiksni podatak, kao kod konvencionalnih sinhronih generatora, jer se brzina turbine menja sa promenom brzine vetra. Uključivanjem vetroagregata koji imaju mogućnost pružanja veštačkog inercijalnog odziva u proizvodni mikrosistem, dolazi do modifikacije računanja konstante inercije sistema i specifične kinetičke energije. Stoga su u nastavku prikazane jednačine konstante inercije sistema (9) i specifične kinetičke energije (10) koje uvažavaju kinetičku energiju dobijenu iz vetroagregata.

$$H_{sys,i} = \frac{\sum_{n=1}^{N_{sg,i}} H_{SG,n} \cdot S_{nom,n} + \sum_{m=1}^{N_{va,i}} H_{ve,m,i} \cdot S_{nom,m}}{\sum_{k=1}^{N_i} S_{nom,k}} \quad (9)$$

$$E_{K,sp,i} = \frac{\sum_{n=1}^{N_{sg,i}} H_{SG,n} \cdot S_{nom,n} + \sum_{m=1}^{N_{va,i}} H_{ve,m,i} \cdot S_{nom,m}}{\sum_{k=1}^{N_i} P_k} \quad (10)$$

gde je $\sum_{m=1}^{N_{va,i}} H_{ve,m,i} \cdot S_{nom,m}$ ukupna kinetička energija vetroelektrana kojom sistem raspolaže kroz emulaciju inercije tko posmatranog i -tog intervala.

3 ANALIZA POTENCIJALA KINETIČKE ENERGIJE U VETROELEKTRANI ČIBUK 1 TOKOM 2023.

Vetroelektrana Čibuk 1 je instalisane snage 158,46 MW i čini je 57 vetroagregata GE 2.75- 120. Osnovne tehničke specifikacije vetroagregata koje su od interesa za proračun kinetičke energije su date u Tabeli II. dok je moment inercije vetroagregata J izračunat na strani turbine. Autorima su na raspolaganju bili podaci o izmerenoj proizvodnji i brzini vetra na nivou svakog vetroagregata tokom 2023. godine sa 10-minutnom rezolucijom, kao i zbirna snaga proizvodnje vetroelektrane i broj operativnih vetroagregata sa 15-minutnom rezolucijom. Raspoloživ skup podataka je statistički obrađen sa ciljem da se donesu zaključci koji će biti korišćeni za procenu mogućeg zbirnog doprinosa vetroelektrana inerciji perspektivnog sistema Srbije.

Tabela II: Podaci o vetroagregatu GE 2.75120

H [s]	ω_{min} [obr/min]	ω_{max} [obr/min]	v_{cut-in} [m/s]	v_{nom} [m/s]	$v_{cut-out}$ [m/s]	J [kg m ²]
3,5	8	13	3	12,5	25	$10,5 \cdot 10^6$

Od interesa za predmetnu analizu je broj vetroagregata koji su sinhronizovani na mrežu. Prvi razlog zbog kog vetroagregat nije na mreži je neraspoloživost usled aktivnosti održavanja, popravki ili zaleđivanja. Prosečna raspoloživost vetroagregata u VE Čibuk 1 tokom 2023. godine je bila 98,64%. Svi vetroagregati su bili operativni tokom 5010 sati, dok je najmanji zabeleženi broj raspoloživih vetroagregata 50.

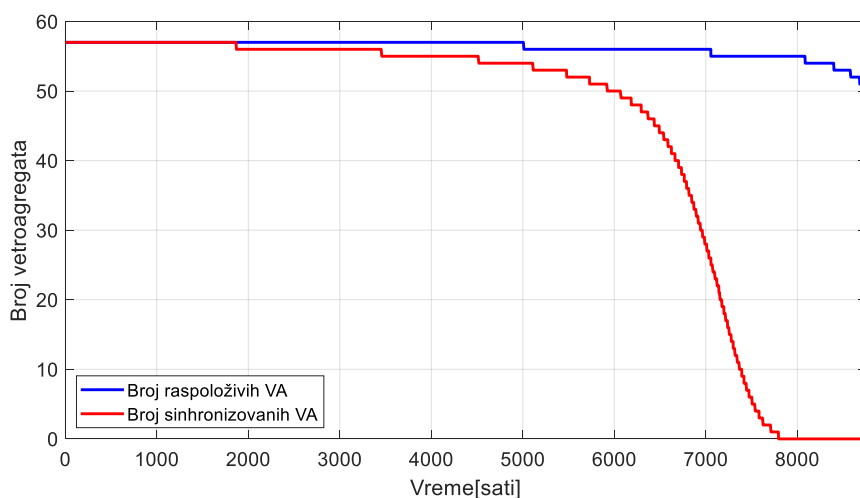
Drugi razlog zbog kojeg vetroagregat nije sinhronizovan je brzina vetra izvan operativnog opsega (manja od 3 m/s ili veća od 25 m/s). Detektovanje vetroagregata koji su sinhronizovani na mrežu je izvršeno prema kriterijumu pozitivne zabeležene snage proizvodnje tokom 10-min intervala. Negativna snaga je pokazatelj da se tokom tog intervala napaja samo sopstvena potrošnja, a da je vetroturbina u stanju mirovanja. Primena prethodnog kriterijuma ukazuje da je svih 57 vetroagregata bilo sinhronizovano tokom 1870 sati, dok nijedan nije bio na mreži tokom 970 sati. Prosečan broj sinhronizovanih vetroagregata je 44.

Na Sl. 1 je prikazan uređen histogram broja raspoloživih (plava linija) i broja sinhronizovanih (crvena linija) vetroagregata (VA) tokom 2023 u VE Čibuk 1.

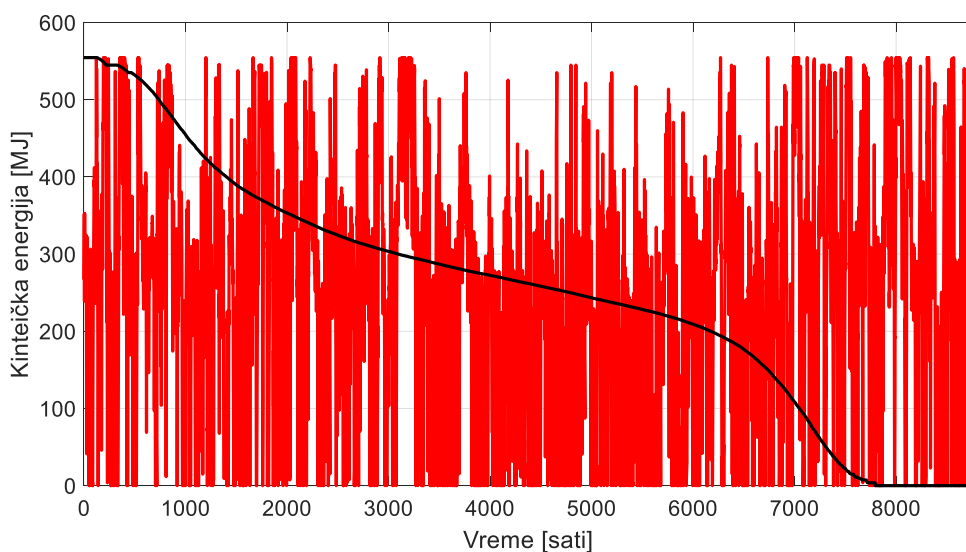
Dalje je izvršen proračun kinetičke energije cele vetroelektrane u skladu sa relacijama (6-8). Dobijena je kinetička energija čiji je dijagram (hronološki i uređen) prikazan na Sl. 2.

Srednja raspoloživa kinetička energija iznosi 245 MWs odnosno oko 44,2% u odnosu na maksimalni kapacitet u zamajnim masama vetroelektrane koji bi se imao kada bi svi vetroagregati bili sinhronizovani i radili sa nominalnom brzinom obrtanja.

Maksimalna kinetička energija postoji tokom približno 130 sati, što odgovara trajanju perioda kada vetroelektrana radi sa instalisanom snagom. S druge strane, raspoloživa kinetička energija je 0 tokom 970 sati, tj, tokom tog trajanja su sve vetroturbine zaustavljene.



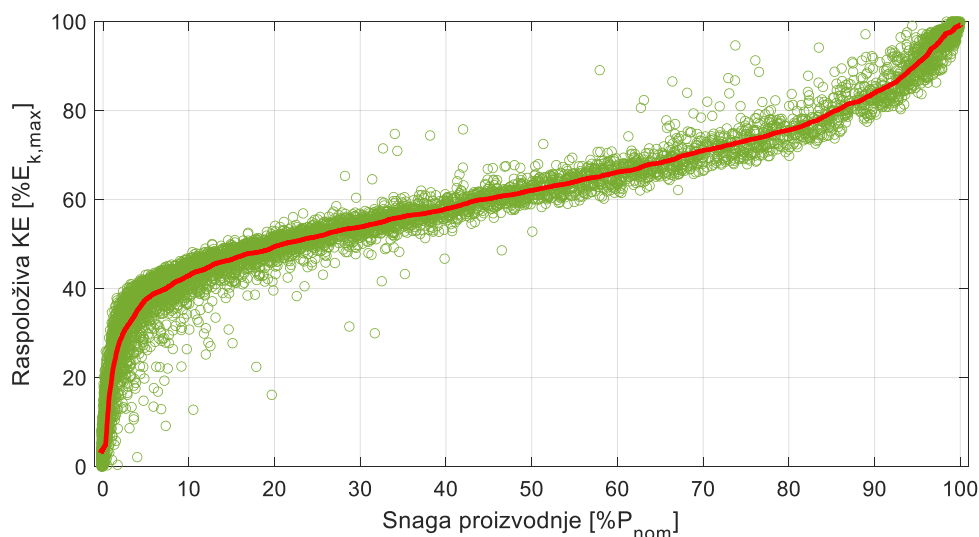
Slika 1: Uređeni histogrami broja raspoloživih i broja sinhronizovanih vetroagregata tokom 2023. godine u VE Čibuk 1



Slika 2: Uređeni i hronološki dijagram kinetičke energije VE Čibuk 1 tokom 2023. godine

3.1 Analiza potencijala kinetičke energije vetroelektrana za perspektivne scenarije

Estimacija kinetičke energije koju će vetroelektrane posedovati u perspektivnim scenarijama je izvršena pod pretpostavkom da će procentualni udeo raspoložive kinetičke energije u odnosu na normalizovanu proizvodnju VE Čibuk 1 tokom 2023 biti isti i za perspektivne vetroelektrane. Na Sl. 3 je prikazana zavisnost raspoložive normalizovane kinetičke energije od normalizovane snage proizvodnje. Generalno, za proizvodnje veće od 10% se očekuje linerani priraštaj raspoložive kinetičke energije sa povećanjem proizvodnje, i to oko 0,7% na svaki dodatni % proizvodnje. U domenu male proizvodnje je zavisnost sa većim koeficijentom proporcionalnosti jer se ovde očekuje da mala promena u brzini vetra, tj. mali priraštaj u snazi proizvodnje dovede do uključenja novih vetroagregata, što ima veći uticaj na priraštaj dostupne kinetičke energije.



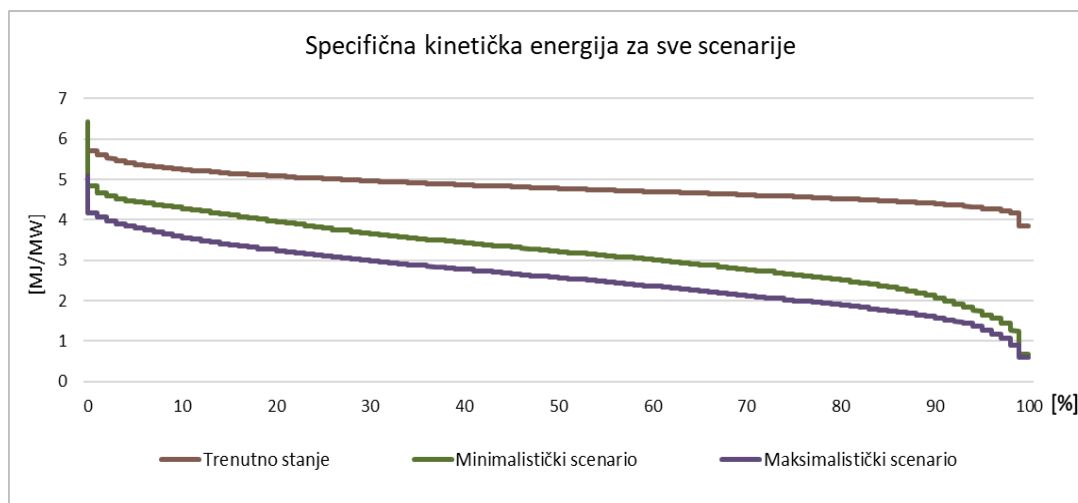
Slika 3: Zavisnost raspoložive kinetičke energije od snage proizvodnje vetroelektrane

Kako bi se dobila ukupna raspoloživa kinetička energija u zamajnim masama perspektivnih vetroelektrana u nekom satu i, očekivanu satnu proizvodnju tokom određenog sata treba normalizovati prema ukupnoj instaliranoj snazi vetroelektrana za analizirani scenario, a onda sa dijagrama na Sl. 3 odrediti odgovarajući nivo raspoložive kinetičke energije u odnosu na maksimalnu.

4 SISTEMSKA INERCIJA U SADAŠNJEM I PERSPEKTIVNOM SISTEMU SRBIJE UZ DOPRINOS VETROELEKTRANA KROZ INERCIJALNI ODZIV

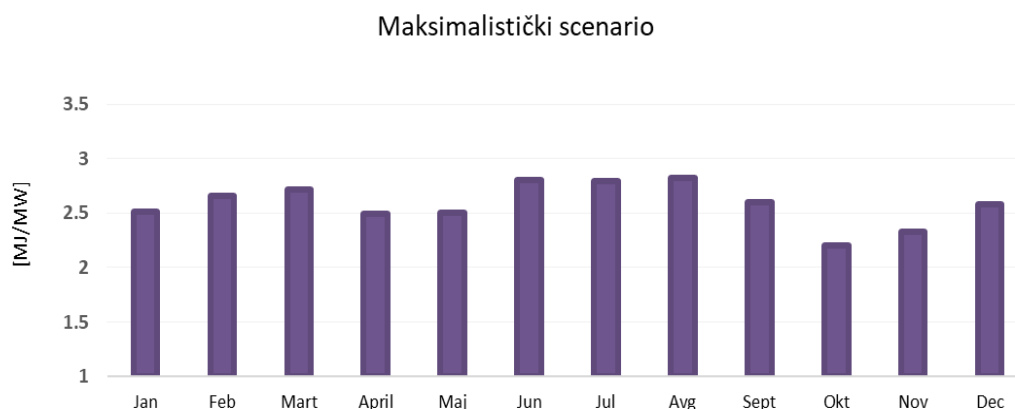
Proračun inercije EES-a Srbije za postojeće stanje je izvršena na osnovu ulaznih podataka o tehničkim specifikacijama svih agregata koji su bili priključeni na EES Srbije i satnih snaga proizvodnje vetroelektrana tokom 2023. godine, koja je uzeta kao referentna godina za referentno stanje. Proračun parametara inercije za perspektivno stanje instaliranih kapaciteta OIE u 2030. godine je izvršen za dva scenarija u skladu sa instaliranim kapacitetima iz Tab.1. Za analizirane scenarije izvršen je proračun proizvodnje vetroelektrana prema raspoloživim meteorološkim podacima i izvršena je simulacija rada sistema Srbije, na osnovu koje su definisane stane vrednosti proizvodnje svake konvencionalne elektrane i obnovljivih izvora energije. Na osnovu ranije opisane metodologije izvršen je proračun specifične kinetičke energije. Na Sl. 4 je prikazan histogram specifične kinetičke energije za sva tri slučaja uz pretpostavku da vetroelektrane ne učestvuju u inercijalnom odzivu.

Za trenutno stanje je tokom godine 90% vremena specifična kinetička energija veća od 4,41 MJ/MW, pri čemu je njena godišnja srednja vrednost 4,81 MJ/MW. Na godišnjem nivou ukupna varijacija specifične kinetičke energije za trenutno stanje je mala. Razlog tome je relativno mala instalirana snaga OIE, pa sam tim i njihovo učešće u ukupnoj proizvodnoj strukturi EES-a Srbije. S druge strane, konvencionalni izvori, koji su glavni nosioci proizvodnje u postojećem stanju, unose malu varijaciju u promeni specifične kinetičke energije jer se njihovim uključenjem ili isključenjem sa sistema približno podjednako povećava i brojilac i imenilac u relaciji (5). Sa značajnim učešćem OIE, dolazi do povećanja proizvodnje i potiskivanja konvencionalnih elektrana sa mreže, čime se u izvesnoj meri smanjuje brojilac i povećava imenilac u relaciji (5), što rezultuje smanjenjem specifične kinetičke energije sistema. Osim toga, varijabilnost proizvodnje OIE dovodi do veće vremenske promene specifične kinetičke energije zamajnih masa u sistemu.



Slika 4: Histogram specifične kinetičke energije za trenutno stanje, minimalistički i maksimalistički scenario bez učešća vetroelektrana u inercijalnom odzivu

Zaključak je da razvoj OIE bitno utiče na smanjenje specifične kinetičke energije. Očekivano, najkritičniji slučaj je maksimalistički scenario. Kako bi se stekao bolji uvid u trend promene specifične kinetičke energije tokom godine, na Sl. 5 je dat grafički prikaz srednjih mesečnih vrednosti specifične kinetičke energije za maksimalistički scenario za pretpostavku da vetroelektrane ne učestvuju u inercijalnom odzivu.

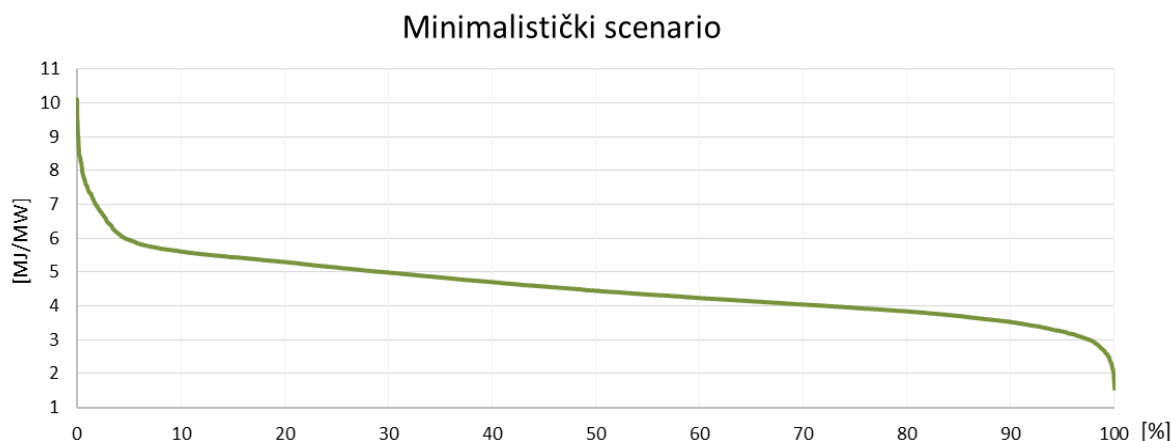


Slika 5: Srednje mesečne vrednosti specifične kinetičke energije u maksimalističkom scenariju

U maksimalističkom scenariju, zbog velikog nivoa penetracije vetroelektrana, njihova proizvodnja ima dominantan uticaj na smanjenje srednje mesečne vrednosti specifične kinetičke energije. Kao rezultat navedenog, mesec oktobar je najkritičniji sa smanjenjem specifične kinetičke energije, za čak 56% u poređenju sa trenutnim stanjem.

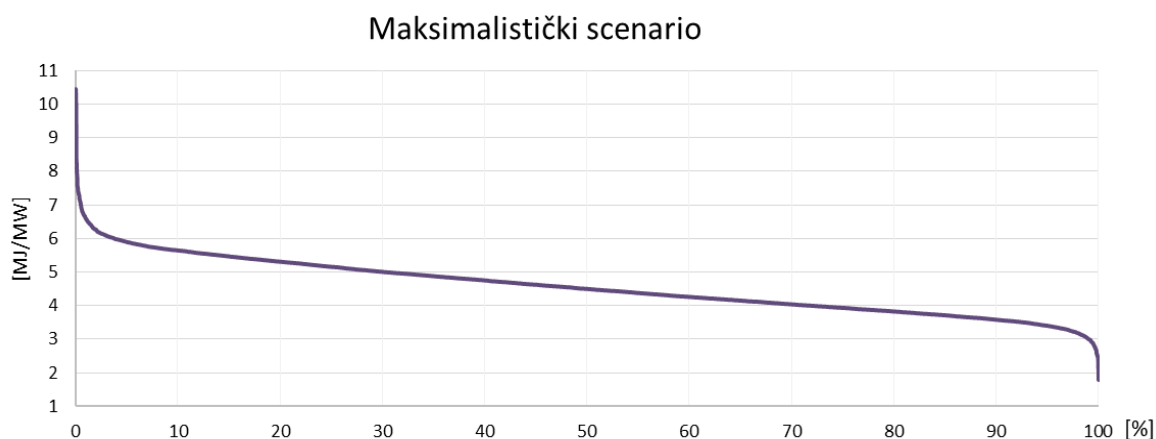
4.1 Perspektivni scenariji sa doprinosom vetroelektrana u inercijalnom odzivu

U nastavku je razmatran doprinos vetroagregata usled veštačkog inercijalnog odziva na specifičnu kinetičku energiju sistema Srbije. U proračunima je uvažena pretpostavka da svi vetroagregati imaju mogućnost pružanja inercijalnog odziva. Primenom relacije (10) dobijeni su rezultati specifične kinetičke energije za definisane perspektivne scenarije razvoja OIE u EES-u Srbije. Na Sl. 6 prikazan je histogram specifične kinetičke energije za minimalistički scenario, kada vetroagregati pružaju inercijalnu podršku sistemu kroz emulaciju inercije.



Slika 6: Histogram specifične kinetičke energije za minimalistički scenario uz uvažavanje inercijalnog odziva vetroagregata

Na Sl. 7 prikazan je histogram specifične kinetičke energije za maksimalistički scenario, kada vetroagregati pružaju inercijalnu podršku sistemu.



Slika 7: Histogram specifične kinetičke energije za maksimalistički scenario uz uvažavanje inercijalnog odziva vetroagregata

Radi lakšeg poređenja razmatranih scenarija, u Tab. III dat je prikaz najvažnijih parametara specifične kinetičke energije za sve scenarije, gde su:

$E_{K,spsr}$ – srednja vrednost specifične kinetičke energije,

$E_{K,sp90\%}$ - vrednost od koje je specifična kinetička energija tokom 90% vremena veća

$E_{K,sp99\%}$ - vrednost od koje je specifična kinetička energija tokom 99% vremena veća.

Zaključuje se da uključivanje vetroagregata u inercijalni odziv značajno poboljšava specifičnu kinetičku energiju sistema. Prednosti najviše dolaze do izražaja u satima kada je procentualni udeo vetroelektrana u proizvodnom miksui veliki. Pozitivan uticaj inercijalnog odziva vetroagregata preovladava u maksimalističkom scenariju, pri čemu se dobija veća srednja vrednost specifične kinetičke energije za oko 75%. Dobijeni rezultati su posledica duplo većeg instalisanog kapaciteta vetroelektrana u maksimalističkom scenariju u poređenju sa minimalističkim scenarijem.

Tabela III: Pregled najvažnijih parametara specifične kinetičke energije

	Referentno stanje 2023. god	Minimalistički scenario 2030. god		Maksimalistički scenario 2030. god	
		Bez VA u inercijalnom odzivu	Sa VA u inercijalnom odzivu	Bez VA u inercijalnom odzivu	Sa VA u inercijalnom odzivu
$E_{K,spsr}$ [MJ/MW]	4,81	3,22	4,55	2,58	4,56
$E_{K,sp90\%}$ [MJ/MW]	4,41	2,14	3,52	1,61	3,57
$E_{K,sp99\%}$ [MJ/MW]	4,16	1,25	2,66	0,9	2,99

5 ZAKLJUČAK

Rezultati sprovedene analize ukazuju da, uz odgovarajuću strategiju upravljanja, vetroelektrane mogu igrati važnu ulogu u očuvanju frekvencijske stabilnosti EES-a sa visokim udelom proizvodnje iz OIE. U radu je uveden i definisan pojam specifične kinetičke energije sistema. Uvođenjem ovog parametra omogućava se kvantifikacija kapaciteta EES-a sa varijabilnim obnovljivim izvorima energije u pogledu inercijalne podrške sistemu pri poremećajima debalansa aktivnih snaga proizvodnje i potrošnje. Ovaj parametar doprinosi boljem uvidu u dinamičke promene sistemske inercije i omogućava procenu potencijala vetroelektrana da aktivno učestvuju u pružanju usluga inercijalnog odziva. Analizom zavisnosti raspoložive kinetičke energije vetroelektrana od proizvodnje postavljena je osnova za procenu doprinosa vetroelektrana inerciji sistema. Za oba analizirana scenarija zaključeno je da emulacijom inercije perspektivnih vetroelektrana se može značajno unaprediti kapacitet perspektivnog EES-a Srbije u pogledu inercijalne podrške frekvencijskoj stabilnosti. Uprkos značajnom potencijalu koji vetroelektrane poseduju kao resurs za obezbeđivanje inercije, treba napomenuti da se njihov glavni nedostatak ogleda u intermitentnosti energije vetra, zbog čega inercijalni odziv nije uvek zagarantovan.

ZAHVALNICA

Ovaj rad su finansijski podržale Elektromreža Srbije AD i Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije pod brojem ugovora: 451-03-137/2025-03/200103.

6 LITERATURA

- [1] Makolo, Peter, Ramon Zamora, and Tek-Tjing Lie. "The role of inertia for grid flexibility under high penetration of variable renewables-A review of challenges and solutions." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 147 (2021): 111223.
- [2] Aziz, Asma, Aman Than Oo, and Alex Stojcevski. "Frequency regulation capabilities in wind power plant." *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 26 (2018): 47-76.
- [3] Li, Le, et al. "Review of frequency regulation requirements for wind power plants in international grid codes." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 187 (2023): 113731.

- [4] ENTSO-E, Project Inertia – Phase II Recovering power system resilience in case of system splits for a future-ready decarbonised system, January, 2025.
- [5] Aščerić, Milica, Džodić, Kristina i Đurišić, Željko. "Analiza smanjenja sistemske inercije u EES-u Srbije za različite scenarije razvoja instalisanih kapaciteta OIE i doprinos vetroelektrana regulaciji frekvencije.", 36. savetovanje CIGRE, 2023.
- [6] Pieter Tielens, Pierre Henneaux, Stijn Cole, "ASSET STUDY on Penetration of renewables and reduction of synchronous inertia in the European power system – Analysis and solutions", November 2018.
- [7] Pieter Tielens, Dir Van Hertem, "The relevance of inertia in power systems", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 55, 999-1009, 2016, doi:10.1016/j.rser.2015.11.016.
- [8] Ana Fernández-Guillamón, Emilio Gómez-Lázaro, Eduard Muljadi, Ángel Molina-García, "Power systems with high renewable energy sources: A review of inertia and frequency control strategies over time", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 115, 109369, 2019, doi:10.1016/j.rser.2019.1093.
- [9] International Energy Agency. Total primary energy supply (tpes) by source, year and country, <https://www.iea.org/statistics/?country=WORLD&year=2016&category=Key%20indicators&indicator=TPESbySource&mode=chart&categoryBrowse=false&dataTable=ELECTRICITYANDHEAT&showDataTable=true>, Accessed date: 17 October 2018.