

Juostinių transporterių elektros energijos sąnaudų mažinimo priemonės

Dr. Diana Šateikienė*, Dmitrij Terebencev

Klaipėdos valstybinė kolegija

Bijūnų g. 10, LT-91223 Klaipėda, el.paštas d.sateikiene@kvk.lt

(Gauta 2024 m. kovo mėn.; atiduota spaudai 2024 m. balandžio mėn.; prieiga internete nuo 2024 m. gegužės 10 d.)

Anotacija

Šiuolaikinėje pramonėje eksploatuojama įvairių modifikacijų juostinių transporterių, nes tai yra vienas iš energiškausiai efektyviausių būdų transportuojant birias medžiagas gamybos įmonėse, krovos kompanijose ar birių produktų išgavimo vietose. Dėl didėjančių visame pasaulyje elektros energijos kainų, proporcingai didėjo ir juostinių transporterių eksploatacijos kaštai, todėl išaugo galutinio produkto ar paslaugos kaina. Atlikus tyrimą nustatyti pagrindiniai faktoriai, kurie lemia energijos sąnaudų didėjimą eksploatuojant juostinius transporterius. Straipsnyje pateikti sprendimo būdai padedantys mažinti energijos sąnaudas nuo pat transporterio projektavimo žingsnių iki jo eksploatavimo realioje vietoje. Didėjantis energijos suvartojimas eksploatuojant juostinius transporterius neigiamai veikia aplinką, didėja emisijų kiekiai.

Reikšminiai žodžiai: juostinis transporteris, energijos sąnaudos, transportavimo juosta.

Abstract

Different belt conveyors' modifications are operate in modern industry, this is one of the most energy efficient ways of bulk material transportation at production industries, loading and disbaund sites, bulk material digging works. Due to the increasing worldwide electricity prices, the operating costs of belt conveyors increase proportionally resulting incresed price of final product or service. After conducting study, the main factors that determine the increase in energy consumption during the operation of belt conveyors have been identified. In this article solution methods presented to help reduce energy consumption from the design stage to its operational stage. Increased energy consumption of belt conveyors has negative impact on the environment by increased emissions.

Key words: Belt conveyor, energy consumption, conveyor belt

Įvadas

Temos aktualumas. Visame pasaulyje krovos ar transportavimo darbams atlikti naudojama daugiau kaip 2,5 milijonų juostinių transporterių (He, Liu and Zhong, 2020). Juostinis transporteris yra daug energijos sunaudojantis technologinis transportas, kuris yra naudojamas birioms medžiagoms transportuoti jūrų uostų birių krovinių terminaluose, kalnakasybos pramonėje ir kitose pramonės šakose (Grincova, Andrejiova, Marasova, and Khouri, 2019; Yang, Chen, Bu, Zhou, and Ma, 2023). Vieno juostinio transporterio metiniai energijos sąnaudų rodikliai gali būti sumažinti iki 10 % ir kartu sumažinta metinė CO₂ emisija vidutiniškai 90 tonų (He, Pang and Lodewijks, 2017). Pasaulinės elektros energijos sąnaudos transportavimo darbams tiesiogiai veikia aplinkos užterštumo lygį gaminant elektros energiją. Juostinio transporterio energijos sąnaudos sudaro iki 40 % visos transportavimo kainos (Kawalec, Suchorab, Fulawka and Krol, 2020). Todėl pasaulyje plačiai vykdomi energijos sąnaudas mažinančių juostinių transporterių tyrimai tarp mokslininkų, gamintojų ir eksploatuotojų (Bajda and Hardygóra, 2021). Kylant elektros energijos kainoms, poreikis gerai išmanyti energijos sąnaudų valdymą didėja visame pasaulyje (Mathaba and Xia, 2015). Norint drastiškai mažinti standartinių juostinių transporterių elektros energijos sąnaudas, būtina nustatyti pagrindines elektros energijos sąnaudų didėjimo priežastis ir pritaikyti efektyvius elektros energijos mažinimo būdus eksploatuojant juostinius transporterius. Tokiu būdu sumažinti ne tik elektros energijos sąnaudas, bet ir CO₂ emisiją.

Igyvendinant Pramonės 4.0 koncepciją, intelektualiai gamyba, pagrįsta fizinių ir kibernetinių sistemų integracija, yra naujas sprendimas tolesniam energijos taupymui ir išmetamųjų teršalų mažinimui (Jazdi, 2014; Mu et al., 2020; Yaqot, Menezes, and Kelly, 2023). Platus juostinių transporterių naudojimas jūrų uosto krovo kompanijose kraunant birius krovinius į laivus, gamybinėse įmonėse transportuojant birias žaliavas į technologinius įrenginius verčia ieškoti būdų, kad juostinių transporterių našumas išliktų nepakitęs, o energijos sąnaudos mažėtų, todėl būtina identifikuoti faktorius, padedančius mažinti energijos sąnaudas eksploatacijos metu.



Tyrimo problema. Neoptimalus juostinio transporterio eksploatavimas padidina energijos sąnaudų kiekį iki finansiškai nuostolingio lygio. Neefektyviai naudojami energetiniai resursai ne tik didina finansinius kaštus, bet ir neigiamai veikia aplinką, didina CO₂ emisiją gaminant elektros energiją. Būtina nustatyti priežastis, kurios lemia juostinių transporterių elektros energijos sąnaudų didėjimą ir pateikti sprendimo būdus jiems mažinti.

Tyrimo tikslas – nustatyti juostinių transporterių elektros energijos sąnaudų mažinimo priemones.

Tyrimo uždaviniai:

1. Apžvelgti juostinių transporterių panaudojimo galimybes skirtinguose pramonės sektoriuose.
2. Nustatyti faktorius, lemiančius elektros energijos sąnaudų didėjimą, eksploatuojant juostinius transporterius.
3. Pateikti sprendimo būdus, padedančius mažinti juostinių transporterių elektros energijos sąnaudas.

Tyrimo metodika ir jos taikymas

Pagrindinė tyrimų metodika buvo mokslinių šaltinių analizė ir lyginamoji analizė, kurių metu buvo analizuojami atlikti moksliniai tyrimai, susiję su juostinių transporterių energijos mažinimo galimybėmis, lyginti gauti mokslininkų tyrimų rezultatai eksploatuojant juostinius transporterius skirtingose pramonės šakose. Siekiant identifikuoti faktorius, kurie tiesiogiai lemia juostinių transporterių energijos sąnaudas, išanalizuotos mokslo studijos, kuriose pateiktos kalnakasybos pramonės eksploatuojamų juostinių transporterių juostų pažeidimų prevencijos gairės. Atsižvelgiant į ekonominius ir socialinius iššūkius yra didelis poreikis sumažinti juostinių transporterių energijos sąnaudas ir anglies pėdsaką, todėl tyrimo metu analizuoti moksliniai šaltiniai, kuriuose pateiktos priemonės galinčios padėti mažinti CO₂ kiekį eksploatuojant juostinius transporterius.

Tyrimo rezultatai ir jų aptarimas

Juostinių transporterių panaudojimo galimybės. Juostiniai transporteriai yra naudojami įvairiose pramonės šakose biriams produktams transportuoti. Įvairiapusis transporterių panaudojimas skirtingose pramonės šakose yra dėl savo gausybės privalumų. Kaip teigia Ji, Miao and Li (2020), juostinių transporterių pagrindiniai privalumai yra didelis našumas, ilgi transportavimo atstumai, maža apkrova, aukštas transportavimo efektyvumas, sklandžiai atliekamas transportavimo procesas, patogus pakrovimas ir iškrovimas. Juostinis transporteris plačiausiai naudojamas transportuojant burią medžiagą, todėl šiuolaikinė pramonė, naudojant juostinius transporterius gali atlikti gamybos ir transportavimo darbus nepertraukiamai.

Metalo lydymo bei cemento gamybos pramonėse, gaminant metalo lydinius ar cemento gaminius, transportuojamos medžiagos greitis turi įtakos gamybos našumui. Transporterio juosta turi dvi greičio nustatymo galimybes: pasyvus greičio nustatymas ir aktyvus greičio nustatymas (He, Liu and Zhong, 2020; Yang, Chen, Bu, Zhou, and Ma 2023). Atsižvelgiant į transportavimo darbų lygį plačiai įgyvendinamos greičio valdymo sistemos yra geriausias sprendimas eksploatuojant juostinius transporterius (Kawalec, Suchorab, Konieczna-Fulawka and Krol, 2020). Šiuolaikiniai juostinio transporterio darbo parametrai ir charakteristikos suteikia vartotojui galimybę visiškai arba iš dalies automatizuoti transportavimo procesus gamyboje. Juostinių transporterių galimybė automatizuoti gamybos ir eksploatavimo procesus pagerina kokybės valdymo rodiklius.

Juostinis transporteris plačiai naudojamas cheminių medžiagų gamyboje, elektros energijos išgavimo jėgainėse ir įvairiuose jūrų uostų terminaluose (Bajda, Hardygóra and Marasová, 2022). Chemijos pramonėje juostinis transporteris užtikrina saugų medžiagų transportavimą. Eksploatuojant automatizuotus juostinius transporterius, aptarnaujančio personalo kontaktas su transportuojama pavojinga chemine medžiaga sumažinamas iki minimumo, taip užtikrinant



aplinkos ir žmonių saugumą bei didelis dėmesys yra skiriamas juostai, nes ji turi būti atspari transportuojamoms medžiagoms, kurios turi rūgšties ar šarmo.

Nepertraukiamo transportavimo galimybe pasižymintys juostiniai transporteriai yra naudojami ir moderniuose energetikos pramonės įmonėse, kur elektros energija išgaunama naudojant kietąjį kurą (Luo, Huang and Zhang, 2015). Elektros jėgainėse, kur elektros energija išgaunama deginant kietąjį kurą, juostiniai transporteriai užtikrina pastovų ir subalansuotą kietojo kuro padavimo kiekį į deginimo kameras. Automatizuotas kietojo kuro padavimas į deginimo kameras, padidina darbo našumą ir kokybę, kartu pagerina aptarnaujančio personalo darbo sąlygas. Įvertinus juostinio transporterio trūkumus, susijusius su transportuojamos medžiagos išsibarstymu ir transportavimo juostos susidėvėjimu kontaktuojant su atraminiais ritiniais, juostinis transporteris modifikuotas į pakabinamą juostinį transporterį, projektuojant pakabinamą juostinį transporterį, įrenginio metalinių konstrukcijų masės sumažinimas lemia įrenginio kainą (Boslovyak and Lagerev, 2019). Pakabinamas juostinis transporteris plačiai eksploatuojamas birių krovinių jūrų uostų terminaluose iškraunant arba pakraunant įvairias birias medžiagas. Pakabinamas juostinis transporteris neturi atraminių transportavimo juostos ritinių, tokiu būdu yra pašalinama trinties apkrova pagrindinėje transportavimo juostos darbinėje zonoje. Tokia juostinio transporterio modifikacija sumažina transportuojamos medžiagos išsibarstymo tikimybę ir padidina transportavimo juostos eksploatacijos laiką.

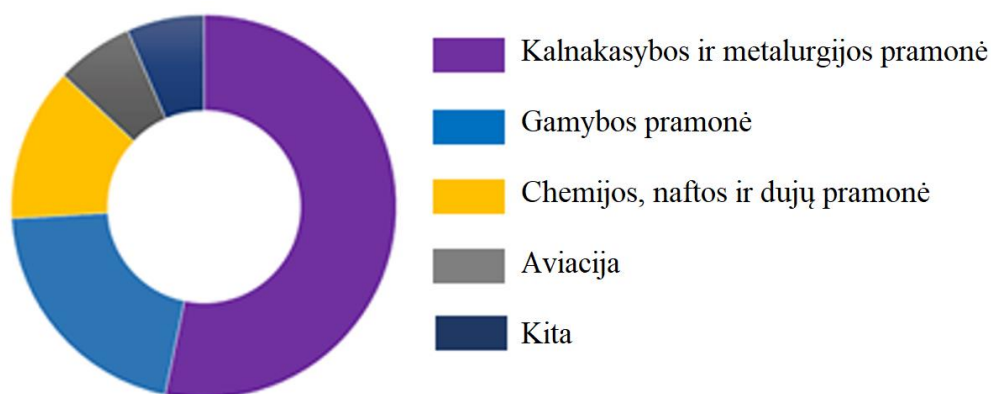
Žemės ūkio produkcijos sandėliuose atliekant rūšiavimo, krovimo ir transportavimo darbus naudojant juostinius transporterius, padidėja transportavimo ir apdirbimo našumas, nuo ko priklauso galutinio produkto kaina. Dėl netolygaus medžiagos pakrovimo srauto ant transportavimo juostos, juostai veikiant nominaliu nustatytu greičiu, transportavimo juostos darbinė zona gali būti nevisiškai apkrauta (He, Pang, Lodewijks, 2016). Greičio valdymo sistema ir algoritmas, valdant transportavimo juostos eigos greitį, atsižvelgiant į kraunamos medžiagos padavimo srautą, mažina energijos sąnaudas (Ji, Miao and Liu, 2021). Žemės ūkio pramonėje transportavimo juostos greičio valdymas realiu laiku prisitaikant prie transportuojamos medžiagos padavimo parametrų gali padidinti juostinio transporterio energinį efektyvumą ir sumažinti transportavimo kaštus.

Pagrindinis technologinis transportas, kuris yra naudojamas kalnakasyboje, užtikrinantis nepertraukiamą aukštą darbo našumą išgaunant žaliavas ir jas transportuojant, yra juostinis transporteris (Kulinowski, Kasza and Zarzycki, 2022; Yang, Miao, Liu, Wang, and Zheng, 2024). Juostiniai transporteriai šiuo metu yra pagrindinis technologinis transportas atviroje ir uždaroje kalnakasybos pramonėje (Bajda, Hardygóra and Marasová, 2022). Stambiausios pasaulyje žinomos kalnakasybos pramonės įmonės sėkmingiausiai eksploatuoja įvairius juostinius transporterius, kurie yra skirtingų modifikacijų, atsižvelgiant į transportuojamą medžiagą: požeminę vario rūdą, akmens anglį arba rusvą anglį (Bajda and Hardygóra, 2021; Hou, Qiao, Dong, and Wu, 2024). Aktualiausia kalnakasybos pramonės užduotis, kad būtų suprojektuoti mažai energijos naudojantys juostiniai transporteriai, o jau eksploatuojamą modernizuoti į efektyvesnį (Bobojanov, Ziyodulla, Ismoilov, Arziev and Togaeva, 2020). Kalnakasyboje vykdomas pastovus birių medžiagų transportavimas iš vieno išgavimo taško į kitą dideliu mastu, tokie transportavimo darbai reikalauja didelių energijos sąnaudų. Juostinis transporteris priskiriamas sunkiosios inžinerijos grupei, projektuojamas ir modernizuojamas atsižvelgiant į naujausius gautų tyrimų rezultatus (Boslovyak and Lagerev, 2019). Juostinio transporterio konstrukcinių komponentų dydžių įvairovė ir geometrinių parametrų platus spektras, mobilumas bei pastovus medžiagos transportavimo srautas suteikia lankstumo ir preciziškumo vykdant biriųjų medžiagų transportavimo operacijas požeminėse vario rūdos kasyklose. Juostinio transporterio mobilumo parametrai suteikia manevringumo laisvę, vykdant transportavimo darbus požeminėse ribotose erdvėse, kur alternatyvūs transportavimo būdai sunkiai įgyvendinami. Atviros kasybos darbai dideliame gylyje yra būdingi dabartiniam kalnakasybos plėtros etapui, transportavimo darbams karjeruose, vis daugiau plečiantis ir gilinant, proporcingai didėja ir transportavimo atstumai (Bobojanov, Ziyodulla, Ismoilov, Arziev and



Togaeva, 2020). Kalnakasyboje žaliavos išgavimo vietos yra nutolusios nuo apdirbimo gamyklos, todėl pasitelkiant dabartinės technologijas bei naudojant ne vieną transportavimo juostą galima pasiekti iki 20 kilometrų transportavimo atstumą (Mathaba and Xia, 2015). Atvirose akmens anglių ir rusvosios anglies kasyklose išgaunamos medžiagos transportavimas į kitus, pagal gamybos planą žaliavos perdirbimo, etapus yra sudėtingas ir daug energijos reikalaujantis procesas, kuris turi įtakos galutinei produkto kainai (Perun, Lazarz and Opasiak, 2020). Tarp juostinių transporterių modifikacijų labiausiai paplitę kelių traukos elementų juostiniai transporteriai, kurie leidžia sumažinti transportavimo juostos kainą, mažinant jos masę bet nebloginant atsparumo gaisrams (Masaki, Zhang and Xia, 2018; Zhang et. al., 2024). Taip panaudojus juostinio transporterio didelio atstumo transportavimo galimybę ir kelių traukos elementų modifikaciją, galima sujungti nutolusius vienas nuo kito paslaugų ir gamybos procesus, užtikrinant nepertraukiamą transportavimo operacijų eigą. Nepertraukiamo transportavimo ilgais atstumais galimybė drastiškai padidina darbo kokybę visuose gamybos bei pramonės sektoriuose.

Juostiniai transporteriai plačiai naudojami birioms medžiagos transportuoti kasybos, metalurgijos, chemijos pramonėse bei jūrų uostuose esančiose krovos kompanijose (Gładysiewicz, Kawalec, Krol, 2016; Salawu, Bright, Onunka, 2020; Yang, Bu, Chen, 2021). Juostiniai transporteriai naudojami ne tik stambiausios kalnakasybos pramonėje, bet ir kitose pramonės šakose, tokiose kaip mineralinių žaliavų apdirbimo gamyklos, metalo lydymo, cemento, popieriaus gamybos pramonės, statybų sektorius ir žemės ūkio gamyklos (Perun, Lazarz and Opasiak, 2020). Viena iš didžiausių pasaulyje rinkos tyrimų ir verslo žvalgybos kompanijų atliko tyrimą daugiau nei šimte pramonės šakų ir nustatė juostinių transporterių pasiskirstymą pasaulyje, atsižvelgiant į pramonės sektorius, rezultatai pateikti 1 paveiksle.



1 pav. Juostinių transporterių pasiskirstymas pasaulyje pagal pramonės sektorius
Šaltinis: Expert Market Research, 2023

Fig.1. Worldwide distribution of belt conveyors by industry sectors
Source: Expert Market Research, 2023

Išanalizavus 1 paveiksle pateiktus statistinius duomenis, galima teigti, kad didžioji dalis juostinių transporterių yra naudojami kalnakasybos bei metalurgijos sektoriuose, kiek mažiau nei ketvirtadalį užima gamybos pramonė. Transporterių sistemos rinkos dydis 2022 metais buvo įvertintas 7,7 mlrd. USD. Numatoma, kad konvejerių sistemų pramonė išaugs nuo 8,0 mlrd. USD 2023 metais iki 10,87 mlrd. USD iki 2032 metais (2023–2032 m. m.). Augančios investicijos į automobilių pramonę ir besiplečiantis elektroninės prekybos verslas yra pagrindiniai rinkos veiksniai, skatinantys rinkos augimą, o teisės aktų reformos skatina gamintojus taikyti energijos vartojimo efektyvumą.

Juostiniai transporteriai naudojami labai plačiai, pradedant nuo žemės ūkio produkcijos transportavimo iki įvairiausių pramonės šakų tokių kaip chemijos pramonė, energetika ar

kalnakasyba. Sudėtingus technologinius sprendimus tenka priimti transportuojant dideliais atstumais, didelės masės produktus ar net specifinėmis savybėmis pasižyminčius.

Energijos sąnaudas lemiantys faktoriai, eksploatuojant juostinius transporterius. Projektuojant ir eksploatuojant juostinius transporterius, didelis dėmesys yra skiriamas juostos parinkimui, nes ji yra pagrindinis produkcijos traukos elementas, kuris tiesiogiai kontaktuoja su produktu. Juostinio transporterio traukos elementai pasižymi aukštais energijos nuostoliais nugalint pasipriešinimo jėgas susidarancias tarp mechanškai sąveikaujančių transporterio komponentų, iš kurių didžiausią dalį sudaro tarp transportavimo juostos ir atraminių ritinėlių veikianti trinties jėga (Bajda and Hardygóra, 2021). Transporterio eksploatacijos metu, juostos nuokrypis yra vienas dažniausių juostinių transporterių gedimų. Juostos nukrypimas nuo vidurio į vieną ar kitą pusę, sukelia slydimo trintį, transportuojamų medžiagų išsibarstymą ir daro poveikį aplinkai, bet ir neigiamai veikia įrangos nusidėvėjimą ir padidina energijos suvartojimą, o tai daro didelę įtaką ekologiškai gamybai bei tvariam įmonių vystymuisi (Zhang, Jiang, Cao, Li, Hao, and Zhang, 2022). Visame transportavimo juostos ilgyje, dėl atraminių ritinėlių, susidaro 2–5 % nukrypimo nuo plokštumos ir tai sudaro 50–80 % pasipriešinimo jėgos, kurią turi nugalėti traukos elementas, atliekant transportavimo darbus (Kulinowski, Kasza and Zarzycki, 2022). Kitas svarbus faktorius, kad eksploatuojant juostinį transporterį, kai juosta buvo pažeista bei sugadinta ir juostos defektai pašalinami, juosta atnaujinama bei vulkanizuojama ir toliau eksploatuojama, energijos sąnaudos per kalendorinius metus išauga iki 4,8 %. Aukštiems energijos sąnaudų rodikliams, eksploatuojant juostinius transporterius, labiausiai lemia traukos elemento parametrų pasirinkimas, transporterio pagrindinių komponentų techninė būklė ir jų kokybė, transporterio darbo parametrų pasirinkimas ir transporterio techninės priežiūros kokybė. Nepertraukiamai vykdant birių medžiagų transportavimo darbus, greičiausiai susidėvintis juostinio transporterio komponentas yra transportavimo juosta. Didinant transporterio juostos pakilimo kampą horizontalios padėties atžvilgiu iki 20 laipsnių, transportuojant birias medžiagas, energijos sąnaudos gali padidėti iki 40 % ir daugiau, priklausomai nuo pasirinktų darbo parametrų (Bobojanov et al., 2020). Dažniausiai, eksploatuojamų juostinių transporterių pagrindinis trūkumas yra susijęs su transportavimo juostos ir transporterio komponentų nusidėvėjimu po ilgalaikio eksploatavimo (Boslovyak and Lagerev, 2019). Juostinio transporterio komponentų netinkama techninė eksploatacija ir priežiūra, padidina susidėvėjimo tikimybę anksčiau nei yra numatytas tarnavimo laikas, todėl laiku nepastebėti gedimai, drastiškai padidina energijos sąnaudas, galiausiai tai gali apriboti visos transportavimo linijos efektyvumą ateityje (Perun et al., 2020). Eksploatuojant juostinį transporterį ir atliekant transporterio periodinę techninę patikrą, skiriant didžiausią dėmesį transportavimo juostos techninei būklei, sumažinama nuostolingų energijos sąnaudų dalis ateityje.

Juostos greičio reguliavimas mažina juostinio transporterio eksploatacines energijos sąnaudas (Mu et al., 2020; Zeng, Wu, Chu, and Yue, 2015). Šio proceso valdymui, Fuzzy loginis valdiklis labiausiai paplitęs naudojant pasyvaus greičio kontrolės metodą (He, et al., 2020). Tokiu atveju įdiegiama pasyvaus greičio kontrolės sistema, kurioje transporterio juostos eigos greitis pritaikomas prie transportuojamos medžiagos padavimo srauto, taip padidinant juostinio transporterio našumą ir energetinį efektyvumą (He, Pang and Lodewijks, 2016). Mokslininkai, siekdami sumažinti juostinio transporterio energijos sąnaudas, atliko energijos sąnaudų tyrimą, kontroliuojant transportavimo juostos eigos greitį. Išanalizavus tyrimo metu gautus duomenis, nustatyta, kad valdant transportavimo juostos greitį, energijos sąnaudos sumažėja. Transportavimo juostos eigos greičio ir transportuojamos medžiagos fizinių savybių kombinacija, tarpusavyje įtakoja transporterio energetinį efektyvumą ir naudingumą. Juostinio transporterio ankstyvo projektavimo etape, netinkamai įvertintos kraunamos birios medžiagos fizinės savybės, gali padidinti energijos sąnaudas ir sumažinti transporterio naudingumo rodiklius (Ji, Miao and Li 2020).

Vykdant transportavimo darbus, šiuolaikiniai didelio galingumo juostinių transporterių varikliai, didina energijos sąnaudas, todėl dėl kylančių visame pasaulyje elektros energijos kainų



kyla ir transportavimo kaštai (Bajda, Hardygóra and Marasová, 2022). Juostinis transporteris yra tipiška energijos konvertavimo sistema iš elektros energijos į mechaninę energiją, projektavimo metu, tobulinant transporterio konstrukcinius elementus ir jų kokybę, mažinamos energijos sąnaudos (Luo, Huang and Zhang, 2015; Yang, Chen, Bu, Zhou, and Ma, 2023). Juostinius transporterius reikia suprojektuoti taip, kad transportuojant produkciją sunaudotų kuo mažiau energijos, todėl taptų energiškai naudingesnis. Suprojektuotas juostinis transporteris, atsižvelgiant į transportavimo darbų parametrus, transportuodamas birias medžiagas, sumažins traukos elementui tenkančią nuostolingą energijos sąnaudų dalį. Optimali darbui pasirinkta aplinkos temperatūra, taip pat mažins energijos sąnaudas (He, et al., 2020). Suprojektuotas juostinis transporteris pagal tinkamai įvertintus transportavimo darbų parametrus, transportuodamas birias medžiagas, sumažins traukos elementui tenkančią nuostolingą energijos sąnaudų dalį. Didžiausios Pietų Afrikos energetikos kompanijos „Eskom“ pateiktuose tyrimų rezultatuose nurodoma, kad visa kalnakasybos pramonė suvarytojo 15 % visos metinės gaminamos elektros energijos, iš kurios 23 % buvo sunaudota transportavimo darbams vykdyti (Masaki, Zhang and Xia, 2018). Kalnakasybos darbuose, juostinio transporterio juosta, gali būti užpildoma ekskavatoriumi, rezultate išnaudojama tik 50-70 % viso juostinio transporterio našumo dėl netolygaus transportavimo juostos užpildymo (Mathaba and Xia, 2015). O iki 40% galutinio produkto savikainos sudaro juostinių transporterių energijos sąnaudos (Kawalec, Suchorab, Fulawka and Krol, 2020). Atraminių ritinelių sukamojo pasipriešinimo testavimo tyrimus atliekantys mokslininkai nustatė, kad atraminiai ritinėliai yra svarbūs tobulinant inžinerinius sprendimus energijos sąnaudų mažinime (Kulinowski, Kasza and Zarzycki, 2022). Siekiant prisidėti prie ekologiškos aplinkos išsaugojimo, reikia pradėti nuo energijos mažinimo projektuojant ir eksploatuojant juostinius transporterius. Tinkamas juostos medžiagos parinkimas, suteikia galimybių sumažinti energijos sąnaudas, nes mažėja juostos pasipriešinimas eksploatacijos metu kontakte su juosta palaikančiais ritinėliais. Eksploatuojant juostinius transporterius galutinė produkto arba teikiamos paslaugos kaina priklauso nuo transporterio energinio efektyvumo. Energijos sąnaudos transportavimo operacijose, neigiamai atsispindės ne tik produkto galutinėje kainoje, bet tai įtakos perteklinę elektros energijos gamybą ir padidintą aplinkos užterštumo lygį visame pasaulyje.

Priemonės padedančios mažinti energijos sąnaudas. Identifikavus faktorius, lemiančius transporterio energijos sąnaudų didėjimą, turi būti imtasi priemonių, kurių pagalba juostinius transporterius eksploatuotumėme su mažesnėmis energijos sąnaudomis. Bajda ir Hardygóra (2021) atlikto eksperimento gauti rezultatai parodė, kad įdiegus energiškai efektyvesnę transportavimo juosta, energijos sąnaudos per kalendorinius metus sumažinamos iki 15,3 %. Norint sumažinti juostinio transporterio eksploatacines energijos sąnaudas, rekomenduojama pasirinkti aukštesnės kokybės juostinio transporterio komponentus, bei didelį dėmesį skirti juostai ir jos kokybei (Bajda et al., 2022). Kaip teigia Bobojanov, Ziyodulla, Ismoilov, Arziev ir Togaeva (2020), naudojantis transportavimo juostos pasirinkimo metodika, kuri yra paremtas juostos pločio parametru, didinant transportavimo juostos plotį, energijos sąnaudos mažėja, dvigubai padidinus juostos plotį, energijos taupymo potencialas gali siekti iki 40 %, tuo pačiu išauga juostinio transporterio kaina. Optimalių transportavimo juostos savybių pasirinkimas, numatytiems ilgalaikiams transportavimo darbams ankstyvame transporterio projektavimo etape, gali drastiškai sumažinti bendras elektros energijos sąnaudas visam transporterio eksploatacavimo laikotarpiui. Ilgalaikėje transportavimo darbų perspektyvoje, prastos kokybės transporterio komponentai, turintys žemas mechanines savybes, turės didesnę susidėvėjimo tikimybę visų eksploatacaviniu laikotarpiu ir sunaudotos elektros energijos kiekis gali didėti.

Išanalizavus juostinio transporterio darbo simuliacijas, nustatyta, kad transportavimo juostos eigos greitį valdant realiu laiku, mažinamos energijos sąnaudos (He, Liu and Zhong, 2020; Yang, Chen, Bu, Zhou, and Ma, 2023). Todėl juostinių transporterių energijos sąnaudas galima sumažinti tinkamai subalansavus juostos greitį ir padavimo kiekį (Yang, Liu, Li and Zhou 2018; Yang, Chen,



Bu, Zhou, and Ma, 2023). Trijų žingsnių ECO (Estimation-Calculation-Optimization) greičio valdymo sistema fiksuoja transportavimo eigos greitį ir krovos darbų našumą, užfiksavus pokyčius automatiškai nustatyto transportavimo juostos eigos greitį, išlaikant minimalų laiko uždelsimą tarp operacijų, tai leidžia gerokai pagerinti transportavimo juostos darbinės zonos užpildymą (He, Pang and Lodewijks, 2017). Eksploatuojant juostinį transporterį neturintį įdiegtos loginio valdiklio greičio valdymo sistemos, bei valdant tiesiogiai pastoviu traukos elemento greičiu, suvartos pastovų elektros energijos kiekį, nepriklausomai nuo transportavimo darbų našumo. Valdant transportavimo juostos eigos greitį, prie traukos elemento pritaikius loginį valdiklį, energijos sąnaudos mažinamos ir lengviau prognozuojamos planuojant transportavimo darbus. Pritaikant greičio valdymo metodą, transportavimo juostos valdymui, galima realiu laiku derinti transportavimo juostos eigos greitį prie transportuojamos medžiagos padavimo srauto, taip gerinant sunaudotos elektros energijos ir transportavimo juostos užpildymo santykį. Fuzzy loginio valdiklio greičio valdymo metodas buvo pritaikytas valdant transportavimo juostos eigos greitį ir parodė puikius elektros energijos suvartojimo rodiklius (Ji et al., 2021).

Pradedant nuo juostinio transporterio projektavimo, rekomenduojama gerinti techninius parametrus, kurie leistų pasiekti energiškai efektyvų darbo režimą, bei gerinti technines charakteristika, atsižvelgiant į specifinius transportavimo darbus, nes tai gali sumažinti energijos sąnaudas iki 27,78 % (Kawalec et al, 2020). Dalis energijos nuostolių tenka transporterio juostos atraminiams ritinėliams įveikiant trinties, inercijos ir gravitacijos jėgas, naudojant aukštesnės kokybės ritinėlius, kuriems sumažintas sukamasis pasipriešinimas, energijos sąnaudos gali sumažėti iki 23 % (Kulinowski et al., 2022). Mokslininkų atlikto C-tipo ir N-tipo transportavimo juostos atraminių ritinėlių tyrimo gauti rezultatai parodė, kad naudojant C-tipo ritinėlius energijos sąnaudų sumažėjimas padidėja iki 6 %. Projektuojant arba modernizuojat juostinį transporterį, įvertinant visus transportavimo darbų parametrus, transportuojamos medžiagos savybes, juostinio transporterio komponentų pasirinkimą ir įdiegtas transportavimo juostos valdymo sistemas, sumažinamos elektros energijos sąnaudos (Peruń, Łazarz and Opasiak, 2020).

Atliekant transportavimo darbų kompiuterines simuliacijas ankstyvame projektavimo etape, galima prognozuoti juostinio transporterio energijos sąnaudas ir nustatyti optimalų darbo režimą. Uždaro ciklo prognozavimo kontrolės modelis (MPC), fiksuoja atliktus darbus ir leidžia greičiau nuspėti transportavimo juostos užpildymo ir padavimo santykį, taip pagerinant energinį efektyvumą eksploatuojant vieno ir daugiau juostinių transporterių sistemas (Luo, Huang and Zhang, 2015; Yang, Chen, Bu, Zhou, and Ma, 2023). MPC uždaro ciklo valdymo sistema, naudojanti grįžtamąją ryšį, nuspėja ir be operatoriaus pagalbos kontroliuoja visas juostinio transporterio arba jų sistemų darbo operacijas. Transportuojant medžiagas dideliais atstumais, efektyviausia energijos sąnaudų atžvilgiu, yra kelių traukos elementų juostinio transporterio eksploatavimas, tai vykdant lėta transportavimo juostos eiga (Masaki et al., 2018). Kai transportavimo atstumas yra 20 kilometrų ar ilgesnis, valdyti yra technologiškai sudėtinga, jei greitis yra didelis, todėl transportavimo darbai vyksta greičiu iki 8 m/s (Mathaba and Xia, 2015). Taikant visas išvardintas priemones nuo pat juostinio transporterio projektavimo iki jo viso eksploatacinio laikotarpio, galima sumažinti elektros energijos sąnaudas ir prisidėti prie CO₂ emisijos mažinimo, vykdant krovos bei transportavimo darbus visose pramonės šakose.

Išvados

1. Juostiniai transporteriai plačiai naudojami kalnakasybos ir metalurgijos pramonėje dėl savo didelio našumo. Juostinių transporterių automatizacijos galimybės leidžia juos panaudoti nepertraukiamai gamybai vykdyti, taip didinant gamybos našumą, todėl plačiai jie yra eksploatuojami žemės ūkio produkcijos ir cheminių medžiagų gamybos pramonėje. Juostiniai transporteriai gali būti modernizuojami ir pritaikomi prie įvairių transportavimo, krovos bei rūšiavimo darbų, todėl šie privalumai suteikė galimybę juos naudoti elektros energijos gamybos pramonėje, jūrų uosto krovos kompanijose bei aptarnavimo sferose.



2. Nustatyta, kad eksploatuojant juostinį transporterį tarp mechaniškai sąveikaujančių komponentų susidaranti pasipriešinimo jėgos padidina energijos sąnaudas. Eksploatacijos metu neišvengiamas juostos nuokrypis nuo centro, tai didina energijos sąnaudas. Mechaniškai pažeidus juostą pigesnis yra remontas, juostos vulkanizavimas nei naujos juostos pirkimas, bet eksploatuojant tokią juostą išauga energijos sąnaudos. Didelės kintančios apkrovos turi neigiamą poveikį konstrukciniams elementams, kurie laikui bėgant dėvisi ir yra nekeičiami naujais, didina energijos sąnaudas.

3. Rekomenduojama juostinio transporterio projektavimo metu įvertinti eksploatavimo sąlygas bei temperatūrą, pagal identifikuotus faktorius parinkti optimalius konstrukcinius elementus, taip pat juostą su C-tipo atraminius ritinėlius, tai leis sumažinti energijos sąnaudas eksploatacijos metu. Techninių charakteristikų gerinimas, traukos elemento darbo našumo valdymas ir periodinės techninės apžiūros atlikimas, juostą keičiant nauja, o ne atnaujinant ar vulkanizuojant, užtikrina energijos sąnaudų mažinimą. Juostinio transporterio traukos elementui neįdiegus loginio valdiklio, neįmanoma kontroliuoti traukos elemento darbo našumą, dėl to energijos sąnaudų švaistymo tikimybė padidėja. Energijos sąnaudas galima mažinti įdiegiant trijų žingsnių ECO greičio valdymo sistemą, o transportuojant didesniu nei 20 kilometrų atstumu, neviršyti 8 m/s greičio.

Literatūra

1. Bajda, M., & Hardygóra, M. (2021). Analysis of the Influence of the Type of Belt on the Energy Consumption of Transport Processes in a Belt Conveyor. *MDPI*, 14 (19). doi: en14196180.
2. Bajda, M., Hardygóra, M., Marasová, D. (2022). Energy Efficiency of Conveyor Belts in Raw Materials Industry. *MDPI*, 15 (9). doi: en15093080
3. Bobojanov, K., Ziyodulla, O. E., Ismoilov, M.T., Arziev, E.I., Togaeva, G. Z. (2020). Study of the efficiency of conveyors of mining transport systems of mining complexes. *E3S Web of Conferences*, 177 (03023). doi: 202017703023
4. Boslovyak, P.V. & Lagerev, A.V. (2019). Optimization of the conveyor transport cost. *Elsevier*, 52 (25), 397-402. doi: 10.1016/j.ifacol.2019.12.569.
5. Gładysiewicz, L., Kawalec, W., & Krol, R. (2016). Selection of carry idlers spacing of belt conveyor taking into account random stream of transported bulk material. *Eksploatacja i Niezawodność*, 18(1), 32-37.
6. Grincova, A., Andrejiova, M., Marasova, D., & Khouri, S. (2019). Measurement and determination of the absorbed impact energy for conveyor belts of various structures under impact loading. *Measurement*, 131, 362-371.
7. He, D., Liu, X., Zhong, B. (2020). Sustainable belt conveyor operation by active speed control. *Elsevier*, 154 (2020). doi: 107458
8. He, D., Pang, Y., & Lodewijks, G. (2017). Green operations of belt conveyors by means of speed control. *Applied Energy*, 188, 330-341.
9. Hou, C., Qiao, T., Dong, H., & Wu, H. (2024). Coal flow volume detection method for conveyor belt based on TOF vision. *Measurement*, 114468.
10. Jazdi, N. (2014, May). Cyber physical systems in the context of Industry 4.0. In *2014 IEEE international conference on automation, quality and testing, robotics* (pp. 1-4). IEEE.
11. Ji, J., Miao, C., Li, X. (2020). Research on the energy-saving control strategy of a belt conveyor with variable belt speed based on the material flow rate. *PLoS ONE*, 15 (1). doi: e0227992.
12. Kawalec, W., Suchorab, N., Konieczna-Fuławka, M. and Król, R. (2020). Specific Energy Consumption of a Belt Conveyor System in a Continuous Surface Mine. *MPDI*, 13 (19). doi: en13195214.
13. Kulinowski, P., Kasza, P., Zarzycki, J. (2022). Methods of Testing of Roller Rotational Resistance in Aspect of Energy Consumption of a Belt Conveyor. *MDPI*, 16 (1). doi: en16010026.
14. Luo, J., Huang, W., Zhang, S. (2015). Energy cost optimal operation of belt conveyors using model predictive control methodology. *Elsevier*, 105 (2014), 196-205. doi: j.jclepro.2014.09.074
15. Masaki, M. S., Zhang, L., Xia, X. (2018). A design approach for multiple drive belt conveyors minimizing life cycle costs. *Elsevier*, 201 (2018), 526-541. doi: j.jclepro.2018.08.040
16. Mathaba, T., Xia, X. (2015). A Parametric Energy Model for Energy Management of Long Belt Conveyors. *MDPI*, 8 (12). doi: en81212375.
17. Mu, Y., Yao, T., Jia, H., Yu, X., Zhao, B., Zhang, X., & Du, L. (2020). Optimal scheduling method for belt conveyor system in coal mine considering silo virtual energy storage. *Applied energy*, 275, 115368.



18. Peruń, G., Łazarz, B., Opasiak, T. (2020). Opportunities to improve the efficiency of the “gwarek 1200” belt conveyor. *Transport problems*, 15 (4), 215-226. doi: 10.21307/tp-2020-061
19. Salawu, G., Bright, G., & Onunka, C. (2020). Modelling and simulation of a conveyor belt system for optimal productivity. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, 1(11), 115-121.
20. Yang, C., Chen, B., Bu, L., Zhou, L., & Ma, L. (2023). Low-order dynamical model and distributed coordinated model predictive control for multi-stage belt conveyor systems. *Journal of Process Control*, 124, 83-91.
21. Yang, C., Bu, L., & Chen, B. (2021). Energy modeling and online parameter identification for permanent magnet synchronous motor driven belt conveyors. *Measurement*, 178, 109342.
22. Yang, C., Liu, J., Li, H., & Zhou, L. (2018). Energy modeling and parameter identification of dual-motor-driven belt conveyors without speed sensors. *Energies*, 11(12), 3313.
23. Yang, D., Miao, C., Liu, Y., Wang, Y., & Zheng, Y. (2024). Improved foreign object tracking algorithm in coal for belt conveyor gangue selection robot with YOLOv7 and DeepSORT. *Measurement*, 114180.
24. Yaqot, M., Menezes, B. C., & Kelly, J. D. (2023). Real-time coordination of multiple shuttle-conveyor-belts for inventory control of multi-quality stockpiles. *Computers & Chemical Engineering*, 178, 108388.
25. Zhang, M., Jiang, K., Cao, Y., Li, M., Hao, N., & Zhang, Y. (2022). A deep learning-based method for deviation status detection in intelligent conveyor belt system. *Journal of Cleaner Production*, 363, 132575.
26. Zhang, D., Liu, M., Wen, H., Wang, Z., Wang, W., Kong, X., & Bing, J. (2024). Study on the characteristics of gas phase products in coal mine conveyor belt fire. *Thermochimica Acta*, 733, 179677.
27. Zeng, F., Wu, Q., Chu, X., & Yue, Z. (2015). Measurement of bulk material flow based on laser scanning technology for the energy efficiency improvement of belt conveyors. *Measurement*, 75, 230-243.

Methods to Reduce Belt Conveyor Energy Consumption

(Received in March, 2024; Accepted in April, 2024; Available Online from 10th of May, 2024)

Summary

Belt conveyor is a main bulk material transportation equipment around the world used in mining and metallurgical industries, power generation industry, marine handling companies, agricultural sites, chemical production industry and service.

Main advantages of belt conveyors are high productivity, long transportation distances, relatively low energy consumption, low load, high transportation efficiency, smooth transportation process, convenient loading and unloading. Belt conveyor requires large energy consumption, it is leading consequences for drastically increased final product price. If belt conveyor does not match technical requirements at operational stage it can lead to increased waste of energy at the same time increased electricity generation and environmental pollution. By electricity prices rising all over the world the main task of belt conveyor manufacturers and users is to improve technical characteristics of the belt conveyor and the main goal of this is to reduce energy consumption during transportation work.

By modernizing and adapting belt conveyor to intended transportation works energy consumption can be drastically reduced. In order to reduce energy consumption for belt conveyor, researches on belt conveyors to get better energy efficiency by improving main conveyor components are carried out.

