

Skaitmeninis kulisinio mechanizmo kinematinų parametrų modeliavimas

Tytas Savickas, Sigutė Savickienė*, Jūratė Vaitekonienė

Klaipėdos valstybinė kolegija, Technologijų fakultetas, Bijūnų g. 10, Klaipėda,
tel. +370 655 91547,

El. paštai: t.savickas@kvk.lt, s.savickiene@kvk.lt, j.vaitekoniene@kvk.lt

(Gauta 2025 m. vasario mėn.; atiduota spaudai 2025 m. vasario mėn.; prieiga internete nuo 2025 m. gegužės 9 d.)

Anotacija

Straipsnyje apžvelgiamos mokslinės ir techninės problemos, susijusios su skaitmeniniu modeliavimu mechanikos inžinerijos srityje. Mašinų kūrimas ir tobulinimas nebeįmanomas be automatizuotų projektavimo sistemų, kurios leidžia inžinieriams vizualizuoti, analizuoti ir optimizuoti prototipus prieš juos gaminant. Tyrimo objektu pasirinktas kulisinių mechanizmų kinematinų parametrų modeliavimas ir vizualizacija, naudojantis kompiuterinės projektavimo programos SolidWorks Motion Analysis įrankiu. Sukūrus skaitmeninį sinusinio kulisinio mechanizmo judesio analizės modelį, buvo sugeneruotos kinematinų parametrų diagramos. Gauti rezultatai patvirtino skaitmeninio modeliavimo tikslumą, didelį greitį ir tiesioginį pritaikomumą mechanikos inžinerijos studijose.

Reikšminiai žodžiai: skaitmeninė inžinerija, sinusinis kulisinis mechanizmas, kinematiniai parametrai, modeliavimas, aktyvūs studijų metodai.

Abstract

The article reviews scientific and technical problems related to digital modeling in the field of mechanical engineering. The development and improvement of machines is no longer possible without automated design systems that allow engineers to visualise, analyse and optimise prototypes before their manufacture. The object of research is the modeling and visualisation of kinematic parameters of link mechanisms using the SolidWorks Motion Analysis tool of the computer-aided design program. After creating a digital motion analysis model of the Scotch Yoke mechanism, diagrams of kinematic parameters were generated. The results obtained confirmed the accuracy, high speed and direct applicability of digital modeling in mechanical engineering studies.

Key words: Digital engineering, Scotch Yoke mechanism, kinematic parameters, modelling, active learning methods

Įvadas

Temos aktualumas. Naujų mašinų ir automatinų linijų projektavimas bei esamų kompleksų modernizavimas turi atitikti kasmet didėjančius efektyvumo, ekonomiškumo ir patikimumo reikalavimus. Šios problemos gali būti išspręstos tik remiantis šiuolaikiniais fundamentaliųjų ir taikomųjų mokslų pasiekimais. Jie lemia dabartinę mokslo ir technologijų pažangos būklę visose pramonės šakose, užtikrinančiose visuomenės gerovę ir saugumą (LIC, 2022).

Projektuojant mašiną būtina užtikrinti, kad kiekvienas numatytas mechanizmas atliktų vieną ar daugiau funkcijų ir užtikrintų pageidaujamą judesį. Mokant Mašinų ir mechanizmų teorijos (toliau - MMT) reikia aprašyti mechanizmus, kuriuos nelengva pavaizduoti statiškais brėžiniais. Visos sąvokos, susijusios su judėjimu, MMT aiškinamos naudojant statiškas figūras, o judėjimas vaizduojamas rodyklėmis, šešėliais arba keliais uždelstais tos pačios sistemos brėžiniais. Tokie vaizdavimo būdai paprastai yra pakankamai aiškūs patyrusiems inžinieriams ir mokslininkams, bet neviseškai suprantami studentams, turintiems silpnus vizualizavimo įgūdžius. Kompiuterinės programos yra įprastas būdas atkurti mechanizmų judėjimą (Uicker, Pennock and Shigley, 2017).

Tyrimas grindžiamas plačiai naudojamų pramonėje ir inžinerijos studijose kulisinių mechanizmų (t. y. judesio keitimo ar jėgos perdavimo svirtinių mechanizmų) modeliavimu ir vizualizacija, naudojantis kompiuterine projektavimo programa SolidWorks. Ši programinė įranga su interaktyvia grafika gali padėti sukurti daugybę interaktyvių mechanizmų, įvedus matematinius apribojimus, tokius kaip pastovūs atstumai, sankirtos, greičiai, pagreičiai, jėgos, momentai (Doane, 2016).

Kulisiniai mechanizmai plačiai naudojami pramonės įrangos pjovimo įrankiams, ruošiniams į darbo zoną tiekti, stūmokliniuose siurbliuose, hidrauliniuose įrenginiuose ir kituose prietaisuose.



Temos problematika. Mechanizmų judėjimas tradiciškai aiškinamas naudojant statiškas figūras ir brėžinius, o analitinis problemos sprendimas yra sudėtingas ir studentų sunkiai suprantamas. Dėl sistemų sudėtingumo ir matematinių lygčių, kuriomis aprašomi tokio tipo mechanizmai, analitinis kinematinės ar dinaminės problemos sprendimas ne visada yra lengvas ir paprastas, todėl naudojamos automatizuoto projektavimo sistemos, padedančios gauti patikimą ir greitą sprendimą, pagrįstą tikrovei artimu modeliavimu (Li, et al., 2014).

Tyrimo objektas – kulisinių mechanizmų kinematinų parametrų modeliavimas ir vizualizacija, naudojantis kompiuterinės projektavimo programos SolidWorks įrankiu *SolidWorks Motion Analysis*.

Tyrimo tikslas – ištirti modeliavimo ir kitų vaizdinių priemonių panaudojimo efektyvumą, siekiant pagerinti *Mašinų ir mechanizmų teorijos* mokymosi patirtį, studentų įsitraukimą bei sudėtingų sąvokų supratimą. Tikslui pasiekti, buvo iškelti šie **tyrimo uždaviniai**:

1) išanalizuoti kompiuterinio projektavimo ir modeliavimo įtrauktį pereinant prie skaitmeninės inžinerijos;

2) atlikti sinusinio kulinio mechanizmo kinematinų parametrų tyrimą, naudojant analitinį metodą bei skaitmeninį modeliavimą, ir įvertinti gautus rezultatus tikslumo ir efektyvumo požiūriu;

3) aptarti interaktyvių vaizdinių priemonių taikymo patirtį ir skaitmeninio modeliavimo integraciją inžinerinėse studijose.

Tyrimo **metodai** – analitinė literatūros apžvalga, kompiuterinis modeliavimas, kokybinis tyrimas, analitinis matematinis metodas.

Rezultatai ir jų aptarimas

Skaitmeninio modeliavimo ir vizualizavimo integracija mechanikos inžinerijoje. Globalizacija lėmė išaugusį gamybos įmonių konkurencingumą, kuris verčia palaikyti nuolatinį naujovių diegimą ir nuolatinį sąnaudų, pristatymo ir kokybės triados optimizavimą. Pastaraisiais metais informacinių technologijų plėtra turėjo įtakos dideliems pokyčiams, padedantiems įmonėms ieškoti vis inovatyvesnių ir konkurencingesnių sprendimų gaminių projektavimo procese. Todėl skaitmeninių inžinerijos priemonių naudojimas tapo neatsiejama bendradarbiaujančio valdymo platformų kūrimo dalimi. Šiandien iš tiesų reikia integruoti įvairius pramoninio proceso etapus (projektavimą, skaičiavimus, pramoninį pritaikymą, gamybą ir t. t.) į veiksmingą ir efektyvų visų su šiais produktais susijusių duomenų, informacijos ir žinių valdymą (Assourocko et al., 2009).

Skaitmeninė inžinerija ir modeliavimas yra labai svarbūs kuriant novatoriškus sprendimus, derinant mokslinius ir technologinius principus, kuriant veiksmingas sistemas. Modeliavimas leidžia inžinieriams vizualizuoti, analizuoti ir optimizuoti prototipus prieš juos gaminant, taip taupant laiką ir išteklius: greitesnis projektavimas, geresnis gaminių naudojimo sričių patvirtinimas, mažiau bandymų, naujų koncepcijų tikrinimas, geresnis veikimo supratimas (Mott et al., 2018).

Kompiuterinis modeliavimas yra esminė XXI a. analitiko ir (arba) tyrėjo, nepriklausomai nuo studijų srities, priemonė. Jis ne tik leidžia pažvelgti į sudėtingų fizikinių ir cheminių sistemų funkcionalumą, bet ir leidžia projektuoti, analizuoti ir optimizuoti tokias sistemas. Be to, per pastaruosius du dešimtmečius revoliucinė algoritmų ir skaičiavimo technologijų pažanga suteikė analitikams ir (arba) tyrėjams galimybę į tokius imitacinius modelius įtraukti daugiau detalių ir tikslumo (Chapra, Canale, 2020).

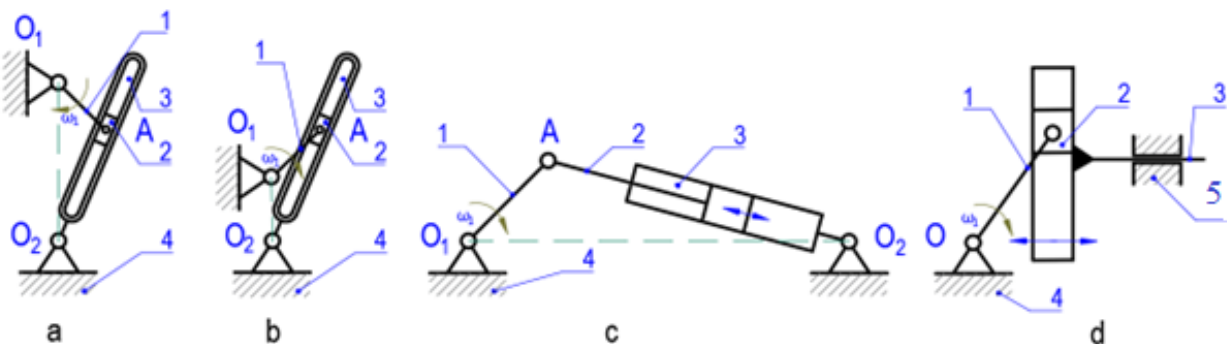
Kompiuteriniam modeliavimui sukurta labai daug įvairių programinių priemonių (<https://www.trustradius.com/simulation>). Mechanikos inžinerijoje dažniausiai naudojamos priemonės padeda kurti, tvarkyti ir analizuoti skaitmeninius modelius: MATLAB – plačiai naudojama algebriniams skaičiavimams ir dinaminiam modeliavimui; ANSYS – inžinerinė programinė įranga, skirta kompiuteriniam skaitmeniniam modeliavimui (CAE); SolidWorks – naudojama 3D projektavimui ir modeliavimui.

Šiame tyrime pasirinktas SolidWorks *Motion Analysis* įrankis, kuris leidžia tiksliai modeliuoti ir analizuoti judesio elementų (įskaitant jėgas, spyruokles, slopintuvus ir trintį) poveikį mazgui.



Motion Analysis naudoja skaičiavimo požiūriu stiprius kinematinis sprendinius, o atliekant skaičiavimus atsižvelgia į medžiagų savybes, masę ir inerciją. Be to, *Motion Analysis* galima naudoti modeliavimo rezultatams nubraižyti, kad juos būtų galima toliau analizuoti (Weber, Verma, 2016).

Kulininio mechanizmo kinematinų parametrų tyrimas ir modeliavimas. Kulisinis mechanizmas – tai mechaninis įtaisas, skirtas judesiui perduoti ar transformuoti, pakeisti įėjimo grandies (skriejiko) sukimosi išėjimo grandies (kulisės) svyravimu arba išėjimo grandies slankiojimu, t. y. šis mechanizmas naudojamas tiesiaiegiam judesiui sukurti iš sukamąjį judesį generuojančių elementų arba atvirkščiai (Pleskas, 2010). Šis mechanizmas paprastai susideda iš keleto elementų: kulisės (kreipiamosios), svirties arba slankiklio ir kinematinės grandinės, kuri perduoda judesį tarp elementų. Kulisiniai mechanizmai vertinami už jų paprastumą, tikslumą ir gebėjimą užtikrinti sklandų tiesiaiegių judėjimą. Praktikoje paplitę įvairūs keturiagrandžiai kulisiniai mechanizmai (1 pav.). Svyruojančiosios kulisės mechanizme skriejiko 1 sukamasis judesys transformuojamas į kulisės 3 svyruojamąjį judesį. Jame skriejiko ilgis O_1A yra trumpesnis nei atstumas O_1O_2 , kuris žymi skriejiko ir kulisės sukimosi ašių nuotolį. Besisukančios kulisės mechanizme šis santykis yra priešingas – skriejiko ilgis O_1A yra didesnis už atstumą O_1O_2 . Hidraulinėse ir pneumatinėse mašinose naudojamo kulisinio mechanizmo kinematinė schema parodyta 1 pav. c. Šio mechanizmo funkcija – paversti kulisėje 3 vykstantį stūmoklio slenkamąjį judesį į skriejiko 1 sukamąjį judesį. Mechanizmas su slankiojančiąja kulise, kurio kinematinė schema parodyta 1 pav. d., vadinamas sinusiniu mechanizmu. Jame išėjimo grandis yra slankiojančioji kulisė 3 (Augustaitis, 2009).



1 pav. Kulisinių mechanizmų kinematinės schemas

a – svyruojančios kulisės mechanizmas, b – besisukančios kulisės mechanizmas, c – kulisinis mechanizmas, naudojamas hidraulinėse ir pneumatinėse mašinose, d – sinusinis mechanizmas, 1 – skriejikas arba svirtis, 2 – kulisės akmuo, 3 – kulisė, 4 – stovas. Šaltinis: sudaryta autorių.

Fig. 1. Kinematic diagram of the coulisse mechanism

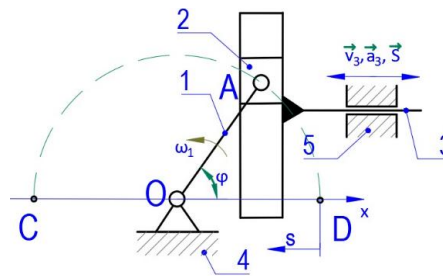
a - mechanism with a swinging coulisse, b - mechanism with a rotating coulisse, c - oscillating cylinder mechanism, d - Scotch Yoke mechanism, 1 - crank, 2 - slider, 3 - coulisse, 4 - base, 5 - guides. Source: compiled by authors.

Mechanizmų kinematika yra mašinų ir mechanizmų teorijos sritis, nagrinėjanti mechanizmų judėjimą, nesusijusį su jį sukeliančiomis ar jį veikiančiomis jėgomis. Jos pagrindinis tikslas – analizuoti mechanizmų grandžių ir taškų judesį bei nustatyti jų padėtis, greičius ir pagreičius įvairiais judesio etapais (Malcoci, Gutu, 2020). Kinematika taikoma tiek analizuojant jau egzistuojančius mechanizmus, tiek juos projektuojant. Analizėje naudojami grafiniai metodai – tinkami vizualiam judėjimo supratimui ir apytiksliams skaičiavimams; taip pat analitiniai metodai, kurie leidžia tiksliai apskaičiuoti judėjimo parametrus sprendžiant matematinį uždavinį modelį (Vinogradov, 2000). Kinematinė sintezė leidžia kurti mechanizmus pagal pageidaujamą judėjimą, sprendžiant atvirkščius uždavinius, t. y. kaip turėtų būti sukonstruotas mechanizmas, kad būtų pasiektas numatytas rezultatas.

Pagrindiniai tyrimų objektai yra mechanizmų grandys ir jų sąveikos taškai, o pradiniai duomenys – mechanizmo geometriniai parametrai (pvz., grandžių ilgiai) bei vienos iš grandžių judėjimo dėsnis. Ši informacija leidžia nustatyti, kaip judės kitos grandys ir kokias trajektorijas formuos jų taškai (Angeles, Bai, 2022). Mechanizmų kinematika yra būtina įvairiose inžinerijos srityse – nuo transporto priemonių ir gamybos įrenginių projektavimo iki robotikos ir automatizavimo sistemų kūrimo. Ji padeda optimizuoti judėjimo efektyvumą, tikslumą ir funkcionalumą, todėl yra neatsiejamą nuo moderniosios inžinerijos procesų.

Siekiant nustatyti grandžių judėjimą apibūdinančius kinematinis parametrus, tokius kaip greitis ir pagreitis, reikia naudoti kinematikos teoremas, kurios galioja įvairiems judesių tipams. Mechanizmo grandžių judėjimo kinematinės charakteristikos yra kintamos, ir gali būti susietos su universalaus argumento funkcija – laiku (tada jos vadinamos kinematinėmis funkcijomis) ir argumento funkcija – apibendrinta koordinate (tada kinematinės charakteristikos vadinamos perdavimo funkcijomis). Kadangi perdavimo funkcija nepriklauso nuo laiko, jos reikšmė leidžia nustatyti bet kurios grandies judėjimo kinematinį parametą, esant bet kokiai įėjimo grandies įvesties greičio vertei (Syrus et al., 2005).

Kulisinių mechanizmų kinematinis parametrai tyrimui ir modeliavimui pasirenkame *sinusinį kulisinį mechanizmą*. Sinusinis kulisinis mechanizmas susideda (Myszka, 2012) iš skriejiko 1, besisukančio stovo 0 atžvilgiu, kurio taškas A sudaro sukimosi kinematinę porą su 2 grandimi – kuliesės akmeniu. 2 jungtis yra sujungta slenkamąja pora su 3 grandimi – jungtimi, judančia išilgai fiksuotų horizontalių kreiptuvų 5 (2 pav.).



2 pav. Sinusinis kulisinis mechanizmas

1 – skriejikas (įėjimo grandis), 2 – kuliesės akmuo, 3 – kulisė (išėjimo grandis), 4 – stovas, 5 – kreiptuvai. Šaltinis: sudaryta autorių

Fig. 2. Scotch Yoke mechanism

1- crank (input link), 2 – slider, 3-coulisse (output link), 4 - base, 5 - guides. Source: compiled by authors.

Tarkime, kad skriejikas OA turi kinematinį dydį r (skriejiko ilgis), o φ – apibendrinta koordinatė (įėjimo grandies pasisukimo kampas). Atsižvelgiant į tai, išėjimo grandies poslinkio S priklausomybė nuo kampo φ bus nustatyta taip (Toločka et al., 2018):

$$S = r - r \cos \varphi = r (1 - \cos \varphi). \quad (1)$$

Diferencijuodami pagal apibendrintą koordinatę φ , gauname išėjimo grandies greičio priklausomybę:

$$v(\varphi) = \frac{dS}{d\varphi} = r \sin \varphi. \quad (2)$$

Diferencijuodami antrą kartą, gauname išėjimo grandies pagreičio priklausomybę:

$$a(\varphi) = \frac{d^2S}{d\varphi^2} = r \cos \varphi. \quad (3)$$

Pereikime nuo perdavimo funkcijų prie išėjimo grandies (žr. 2 pav., 3) greičio V_3 ir pagreičio a_3 kinematinis funkcijų. Gauname šias greičio ir pagreičio priklausomybes, kai įėjimo grandies kampinis pagreitis $\varepsilon_1 = 0$:

$$V_3 = \frac{dS}{d\varphi} \omega_1 = r \sin \varphi \cdot \omega_1, \quad (4)$$

$$a_3 = \frac{d^2 S}{d\varphi^2} \omega_1^2 = r \cos \varphi \cdot \omega_1^2, \quad (5)$$

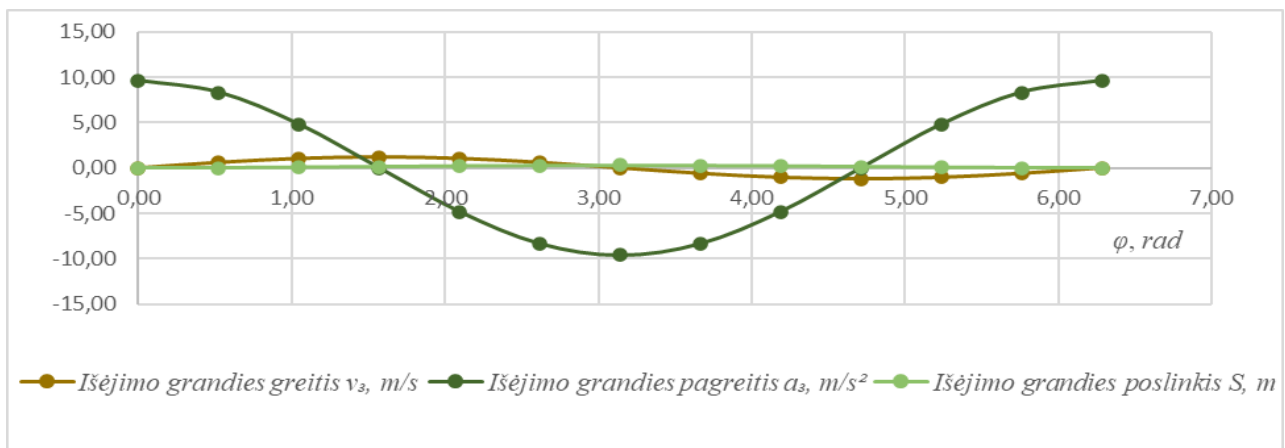
čia ω_1 – įėjimo grandies kampinis greitis.

Naudodamiesi 1, 4 ir 5 formulėmis, apskaičiuojame sinusinio kulisinio mechanizmo kinematinius parametrus (nusistatome, kad skriejiko kampinis greitis $\omega_1 = 8 \text{ rad/s}$; $r = 0,15 \text{ m}$) ir skaičiavimo rezultatus pateikiame 1 lentelėje.

1 lentelė. Sinusinio kulisinio mechanizmo kinematiniai parametrai
Table 1. Kinematic parameters of Scotch Yoke mechanism

Skriejiko pasisukimo kampas φ , radianais	Laikas, s	Išėjimo grandies greitis v_3 , m/s	Išėjimo grandies pagreitis a_3 , m/s ²	Išėjimo grandies poslinkis S , m
0,00	0,00	0,00	9,60	0,00
0,52	0,07	0,60	8,31	0,02
1,05	0,13	1,04	4,80	0,08
1,57	0,20	1,20	0,00	0,15
2,09	0,26	1,04	-4,80	0,23
2,62	0,33	0,60	-8,31	0,28
3,14	0,39	0,00	-9,60	0,30
3,67	0,46	-0,60	-8,31	0,28
4,19	0,52	-1,04	-4,80	0,23
4,71	0,59	-1,20	0,00	0,15
5,24	0,65	-1,04	4,80	0,08
5,76	0,72	-0,60	8,31	0,02
6,28	0,79	0,00	9,60	0,00

Pagal 1 lentelėje pateiktus rezultatus sudarome išėjimo grandies greičio, pagreičio ir poslinkio diagramas, priklausomai nuo skriejiko pasisukimo kampo (3 pav.).

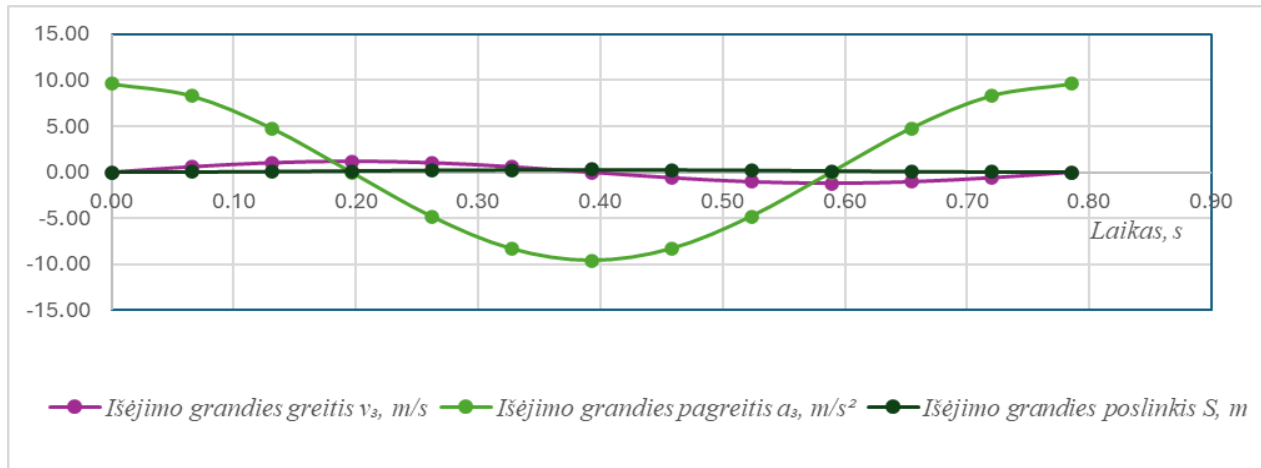


3 pav. Sinusinio kulisinio mechanizmo kinematinų parametų priklausomybės nuo skriejiko pasisukimo kampo.
Šaltinis: sudaryta autorių

Fig. 3. Dependence of the kinematic parameters of the Scotch Yoke mechanism on the angle of rotation of the crank.
Source: compiled by authors.

Tarp padėties, greičio ir pagreičio yra 90 laipsnių ($\pi/2$) fazės poslinkis. Didžiausias greitis pasiekiamas ties nulinės padėties kirtimu (vidurinėje mechanizmo išėjimo grandies padėtyje), o mažiausias greitis pasiekiamas eigos pabaigoje, kai pagreitis yra didžiausias.

Siekdami nustatyti kiekvienu laiko momentu išėjimo grandies greitį, pagreitį ir poslinkį pagal 1 lentelėje pateiktus duomenis, sudarome mechanizmo kinematinų parametų priklausomybių diagramas nuo skriejiko judėjimo laiko.

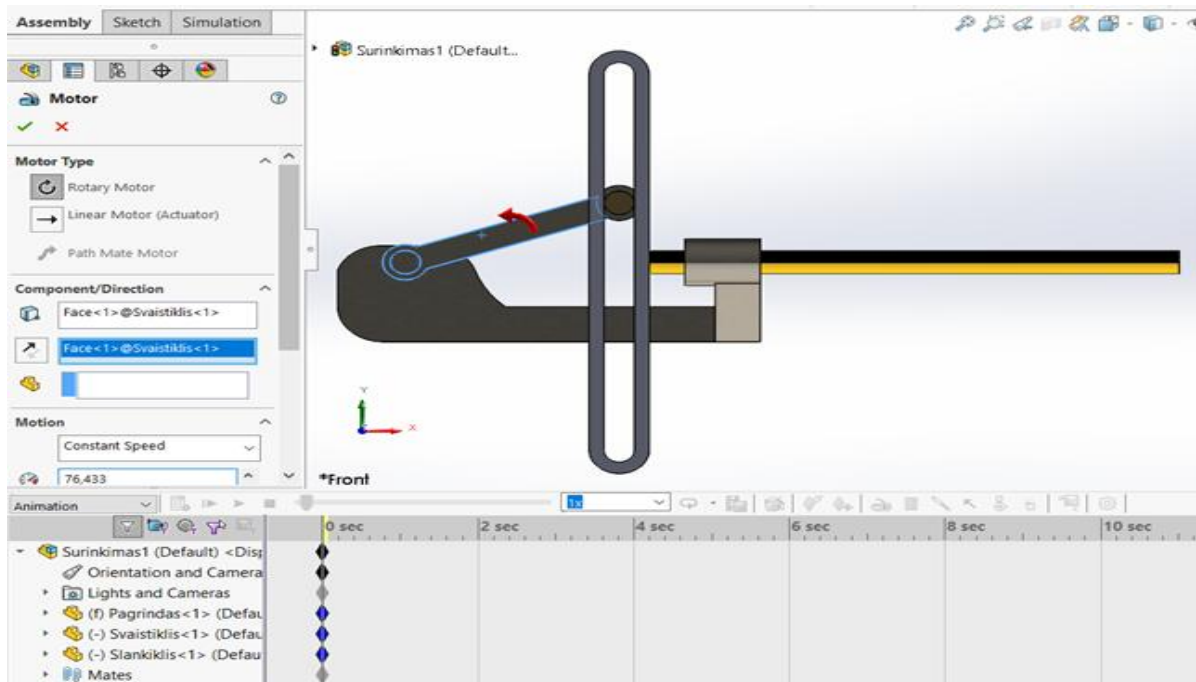


4 pav. Sinusinio kulisinio mechanizmo kinematinųjų parametrij priklausomybės nuo skriejiko judėjimo laiko. Šaltinis: sudaryta autorių

Fig. 4. Dependence of the kinematic parameters of the Scotch Yoke mechanism on the time of the crank's movement. Source: compiled by authors.

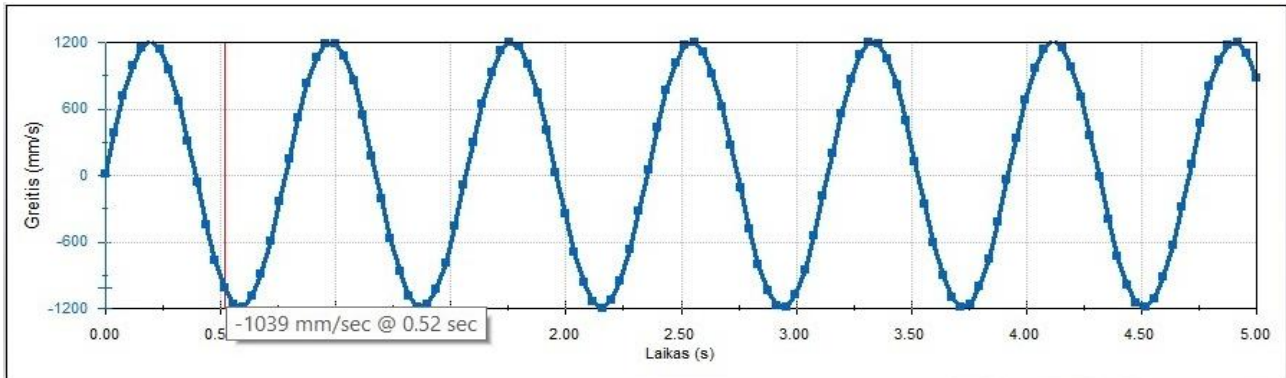
Analizuodami 3 ir 4 paveiksluose pateiktas priklausomybes, matome, kad šiame mechanizme kulisės padėtis, greitis ir pagreitis kinta pagal sinuso ir kosinuso dėsnius. Sinusiniame kulisiniame mechanizme išėjimo grandies greičiai ir pagreičiai priklauso nuo įėjimo grandies parametro r , kai įėjimo grandies kampinis greitis ω_1 .

Kaip matome, šis metodas reikalauja teorinių žinių ir reikia atlikti nemažai inžinerinių skaičiavimų, norint modeliuoti mechanizmą su skirtingais įėjimo grandies duomenimis. Siekiant paspartinti kinematinųjų parametrij tyrimo procesą, galima naudoti skaitmenines technologijas. Šiuo atveju sinusinio kulisinio mechanizmo kinematinųjų parametrij tyrimas atliekamas kompiuterinio projektavimo programa SolidWorks. Pirmiausia sukuriamas sinusinio kulisinio mechanizmo judesio analizės modelis, naudojant tuos pačius įėjimo grandies parametrus kaip ir atliekant analitinius skaičiavimus (5 pav.). Tada kompiuterinės projektavimo programos SolidWorks nustatymuose suaktyvinamas *Motion Analysis* įrankis.



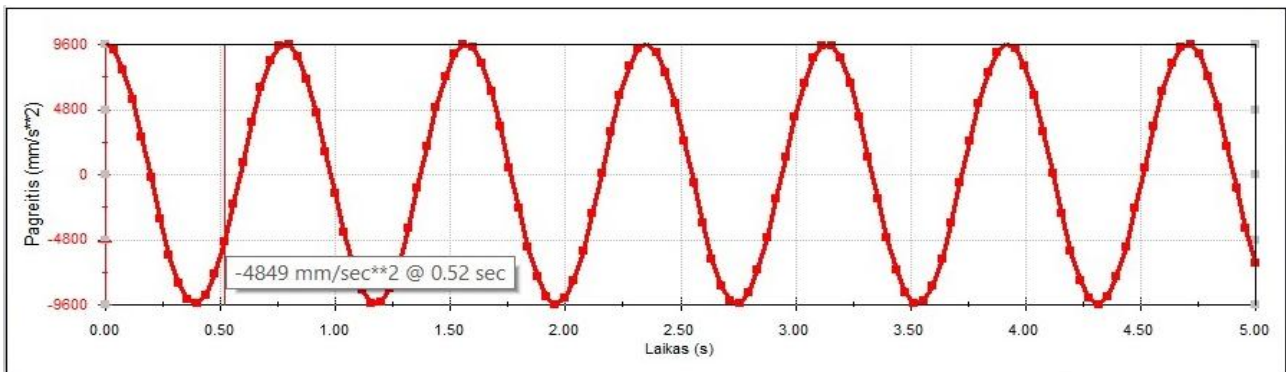
5 pav. Sinusinio kulisinio mechanizmo judesio analizės modelis. Šaltinis: sudaryta autorių
Fig. 5. Motion analysis model of Scotch Yoke mechanism. Source: compiled by authors.

Sukūrus sinusinio kulisinio mechanizmo judesio analizės modelį, kitas žingsnis yra diagramų sugeneravimas. Taip buvo sugeneruotos kinematinio parametrų diagramos, kurios buvo gautos ir taikant analitinį būdą. Su kompiuterine projektavimo programa SolidWorks sugeneruotos diagramos pateiktos 6, 7, 8, 9 ir 10 paveiksluose. Siekiant patikrinti rezultatų tikslumą, kiekvienoje diagramoje paryškinta apytikslė reikšmė, atitinkanti laiką, kai skriejikas yra tam tikroje padėtyje. Kaip matyti, gauti rezultatai patvirtina skaičiavimo metodo tikslumą, bet rezultatų generavimo sparta daug didesnė.



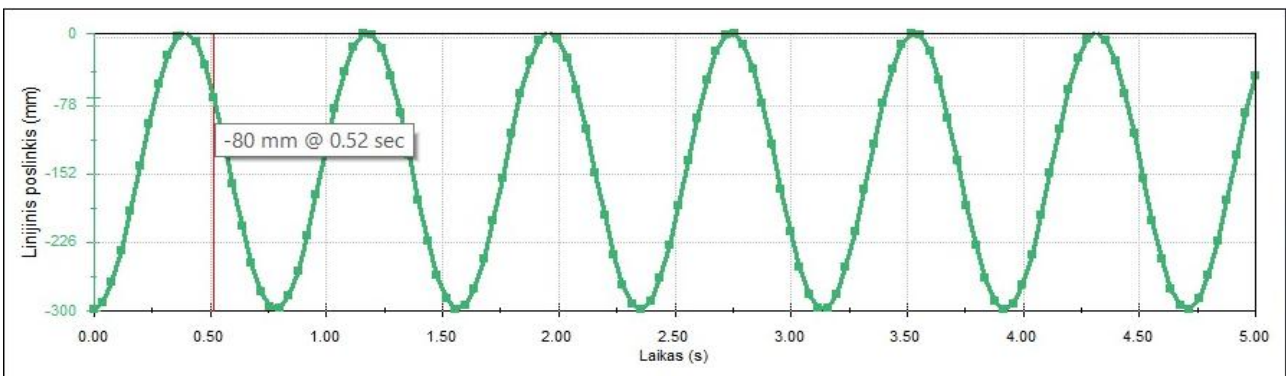
6 pav. Sinusinio kulisinio mechanizmo išėjimo grandies greičio priklausomybė nuo skriejiko judėjimo laiko. Šaltinis: sudaryta autorių

Fig. 6. Dependence of the velocity of the output circuit of the Scotch Yoke mechanism on the time of the crank's movement. Source: compiled by authors.



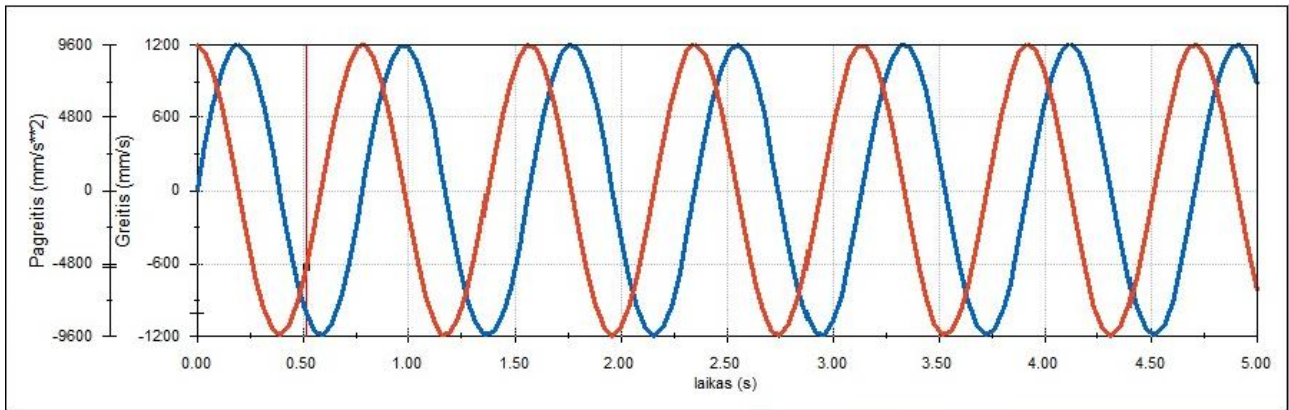
7 pav. Sinusinio kulisinio mechanizmo išėjimo grandies pagreičio priklausomybė nuo skriejiko judėjimo laiko. Šaltinis: sudaryta autorių

Fig. 7. Dependence of the acceleration of the output circuit of the Scotch Yoke mechanism on the time of the crank's movement. Source: compiled by authors.



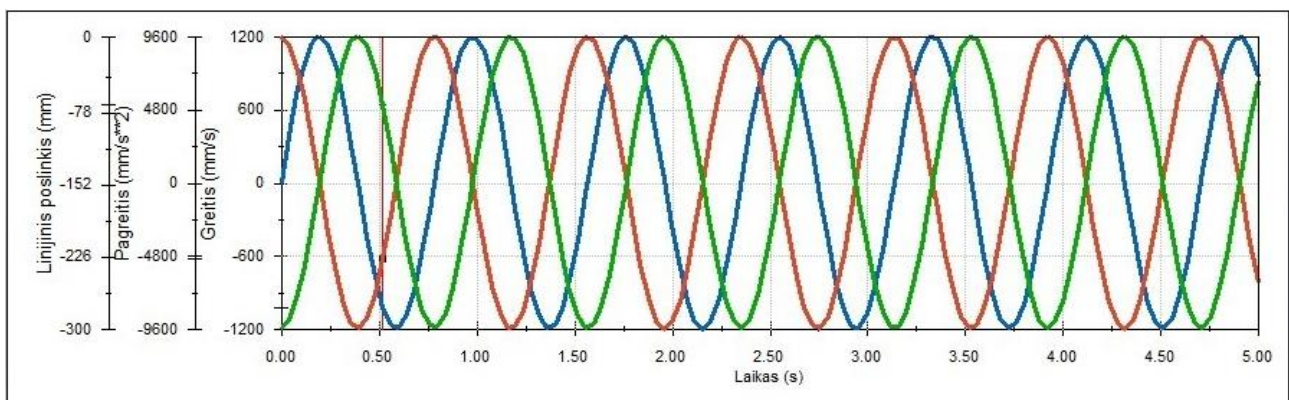
8 pav. Sinusinio kulisinio mechanizmo išėjimo grandies linijinio poslinkio priklausomybė nuo skriejiko judėjimo laiko. Šaltinis: sudaryta autorių

Fig. 8. Dependence of the linear displacement of the output circuit of the Scotch Yoke mechanism on the time of the crank's movement. Source: compiled by authors.



9 pav. Sinusinio kulisinio mechanizmo išėjimo grandies greičio ir pagreičio priklausomybė nuo skriejiko judėjimo laiko. Šaltinis: sudaryta autorių

Fig. 9. Dependence of the velocity and acceleration of the Scotch Yoke mechanism on the time of the crank's movement. Source: compiled by authors.



10 pav. Sinusinio kulisinio mechanizmo išėjimo grandies linijinio poslinkio, pagreičio ir greičio priklausomybės nuo skriejiko judėjimo laiko. Šaltinis: sudaryta autorių

Fig. 10. Dependence of the linear displacement, acceleration and velocity of the Scotch Yoke mechanism on the time of the crank's movement. Source: compiled by authors.

3 ir 4 paveiksluose pavaizduotos analitiniu būdu apskaičiuotos išėjimo grandies poslinkių diagramos parodo, kokių dydžių pasislenka išėjimo grandies galinis padėties taškas D skriejikai sukantis kampiniu greičiu parodyta kryptimi (2 pav.). Kompiuterinė programa sugeneruoja linijinių poslinkių diagramas (9 ir 10 pav.), kuriose vaizduoja išėjimo grandies taško D poslinkį taško C atžvilgiu (maksimalus išėjimo grandies taškų poslinkis yra $2r$, nagrinėjamu atveju 0,3 m). 4 ir 10 paveiksluose pavaizduotos diagramos leidžia bet kurio laiko momentu nustatyti visų nagrinėjamų kinematinų parametrų dydžius tuo pačiu laiko momentu. Naudojant programinę įrangą, galima greitai atlikti daug skaičiavimų ir modeliavimo veiksmų, keisti parametrus bei pamatyti, kokią įtaką jie daro mechanizmo veikimui. Tai leidžia spartinti projektavimo eigą bei nustatyti projektavimo problemas.

Kulisinio mechanizmo skaitmeninio modeliavimo integracijos patirtis mechanikos inžinerijos studijose. Skaitmeninis kulisinio mechanizmo kinematinų parametrų tyrimas buvo demonstruojamas mechanikos ir transporto inžinerijos studentams, studijuojantiems temas, susijusias su kulisinių mechanizmų kinematika, atskirų mechanizmo grandžių poslinkiais, greičiais, pagrečiais. Pradžioje studentai pagal pateiktus sinusinio kulisinio mechanizmo pradinius įėjimo grandies duomenis turėjo savarankiškai apskaičiuoti išėjimo grandies poslinkį, greičius, pagrečius ir pavaizduoti juos grafiškai. Atlikus užduotį, buvo paprašyta studentų pakomentuoti gautus rezultatus. Po to, pagal analogišką užduotį buvo pademonstruota kompiuterine projektavimo programa SolidWorks sukurta vizualizacija. Vizualizacijos įrankiai leido stebėti judesius animacijose, grafikuose ir lentelėse, demonstruota kaip skirtingos jungtys ir judesiai sąveikauja.

Buvo eksperimentuojama su įvairiais parametrais, keistos mechanizmų proporcijos ar judesio įvestis. Tai leido vertinti, kokią įtaką tokie pakeitimai daro mechanizmo veikimui. Šis tyrimas leido palyginti analitinius sprendinius su modeliavimo metu gautais sprendiniais.

Paskaitos pabaigoje buvo vykdoma studentų anketinė apklausa apie tai, kokią įtaką studijų medžiagos įsisavinimui padarė sukurta vizualizacija. Studentai vieningai atsakė, kad vizualizacija suteikė gilesnį supratimą – kompiuterinė simuliacija padėjo geriau suvokti ir interpretuoti gautus rezultatus, suteikė galimybę lengviau įsivaizduoti sudėtingus judėjimo procesus.

Galima teigti, kad mechanizmų kinematinų parametrų tyrimas, naudojant skaitmeninius įrankius, yra labai naudingas interaktyvus studijų metodas, skirtas supažindinti studentus su mašinų ir mechanizmų teorijos praktiniais aspektais. Ši metodika paprastai gali būti įgyvendinama naudojant specializuotą programinę įrangą, tokią kaip MATLAB, SolidWorks ar kitus dinaminių sistemų modeliavimui skirtus įrankius. Mechanizmų kinematinės analizės mokymasis, naudojant kompiuterines programas, suteikia studentams vertingų įgūdžių, pagerina supratimą, įtraukia į praktines, realaus pasaulio situacijas, motyvuoja įgyti patirties, reikalingos šiuolaikiniam inžinieriui ir kurti inovatyvius sprendimus inžinerijos srityje.

Išvados

1. Skaitmeninės transformacijos plėtra lėmė didelius pokyčius gaminių projektavimo procese. Dėl sistemų sudėtingumo ir matematinių lygčių, kuriomis aprašomi mašinų elementai ir mechanizmai, analitinis kinematinės ar dinaminės problemos sprendimas yra sudėtingas ir reikalauja daug laiko, todėl naudojamos automatizuotos projektavimo sistemos, leidžiančios vizualizuoti, analizuoti, gauti patikimą ir greitą sprendimą, pagrįstą tikrovei artimu modeliavimu bei optimizuoti prototipus prieš juos gaminant.

2. Atlikta sinusinio kulisinio mechanizmo kinematinų parametrų analizė – pademonstruoti sinusinio kulisinio mechanizmo kinematinų parametrų tyrimų būdai, naudojant analitinį metodą ir skaitmeninį modeliavimą su kompiuterinio projektavimo programa SolidWorks. Gauti skaitmeninio modeliavimo rezultatai parodo skaičiavimo tikslumą ir didelę veiksmų atlikimo spartą, ypač atliekant sudėtingus skaičiavimus. Tai patvirtina skaitmeninės inžinerijos privalumus. Tyrimo rezultatai išreikšti kinematinėmis diagramomis, vaizduojančiomis mechanizmo išėjimo grandies greičio, pagreičio bei poslinkio kitimą laiko atžvilgiu.

3. Mechanizmų kinematinės analizės mokymasis, naudojant kompiuterines automatizuoto projektavimo sistemas, suteikia studentams vertingų projektavimo įgūdžių, pagerina mechanizmų veikimo supratimą, padeda lengviau suvokti bei interpretuoti gautus rezultatus, įsivaizduoti sudėtingus judėjimo procesus, kuriuos sunku suprasti iš statiškų schemų. Toks studijų metodas leidžia pagilinti teorines žinias, įtraukia į praktines realaus pasaulio situacijas bei motyvuoja studentus įgyti patirties, reikalingos šiuolaikiniam inžinieriui.

Literatūra

1. Angeles, J., Bai, S. (2022). *Kinematics of mechanical systems: fundamentals, analysis and synthesis*. Springer Nature.
2. Assourock, I., Ducellier, G., Eynard, B., Boutinaud, P. (2009). *Processus d'ingénierie numérique et intégration Conception-Calcul*. 19 ème Congrès Français de Mécanique, Marseille.
3. Augustaitis, V. K. (2009). *Mechanizmų mechanika ir elementai. I dalis. Mechanizmų mechanika: Mokomoji knyga. (Antroji laida)*. Vilnius: Technika.
4. Chapra, S., Canale, R. (2020). *Solution Manual of Numerical Methods for Engineers by Chapra*. McGraw.
5. Doane, J. (2016). *Machine analysis with computer applications for mechanical engineers*, John Wiley & Sons Ltd
6. Li, G., Liu, J., Jiang, G., Kong, J., Xiong, H., Sun, Y., & Liu, H. (2014). *Application of modern simulation technology to a theory of mechanics course intended for outstanding engineers*. World Trans. on Engng. and Technol. Educ, 12(1), 54-59.
7. Lietuvos inovacijų centras (LIC). (2022). *Suminis pramonės skaitmeninimo indeksas*. <https://lic.lt/wp-content/uploads/2022/09/skaitmeninimo-indeksas.pdf>.



8. Malcoci, I., Guțu, M. (2020). *Rocker mechanism from classical to modern kinematical analysis*. Journal of Engineering Sciences, (3), 54-64.
9. Mott, R., L., Vavrek, E., M., Wang, J. (2018). *Machine elements in mechanical design. Sixth Edition*. Prentice Hall.
10. Myszka D. H. (2012). *Machines and Mechanisms: applied kinematic analysis - 4th ed*. Prentice Hall.
11. Pleskas, S. (2010). *Mechantronikos komponentai. Mokomoji knyga*. Utena: UAB „Artika“.
12. Syrus, L., Baradokas, P., Michnevič, E., Čiučelis, A. (2005). *Teorinė mechanika. Kinematika. Mokomoji knyga*. Vilnius: Technika.
13. Toločka, R.T., Eidukynas, V., Grigas, V., Kazlauskienė, K., Kondratas, A., Pilkauskas, K., Šulginas, A. (2018). *Theory of Mechanisms and Machines (TMM)*. Kaunas: Technologija.
14. Uicker, J.J., Pennock, G.R., Shigley, J.E. (2017), *Theory of Machines and Mechanisms. Fifth Edition*. Oxford University Press.
15. Vinogradov, O. (2000). *Fundamentals of kinematics and dynamics of machines and mechanisms*. CRC press.
16. Weber, M., Verma, G. (2016). *SolidWorks Simulation 2016 Black Book*. CreateSpace Independent Publishing Platform.

Digital modeling of kinematic parameters of a coulisse mechanism

(Received in February, 2025; Accepted in February, 2025; Available Online from 9th of May, 2025)

Summary

The movement of machines and mechanisms has traditionally been explained in terms of static figures and drawings. The complexity of the systems and the mathematical equations used to describe this type of machinery make the analytical solution of a kinematic or dynamic problem difficult, and therefore computer tools are used to obtain a reliable and fast solution based on close-to-reality simulations.

The aim of the study is to investigate the effectiveness of the use of simulation and other visual tools to improve the learning experience of Machine and Mechanism Theory, student engagement and understanding of complex concepts. The objectives of the study are: 1) to analyse the inclusion of computer-aided design and simulation in the transition to digital engineering; 2) to perform a study of the kinematic parameters of the Scotch Yoke mechanism using an analytical approach and digital simulation and to evaluate the results obtained from the point of view of accuracy and efficiency; 3) to discuss the experience of the application of interactive visual aids and the integration of digital simulation in engineering studies. The research methods include analytical literature review, computer modelling, qualitative research and analytical mathematical method.

This paper reviews the scientific and technical issues related to digital modelling in mechanical engineering. The object of the study is the modelling and visualisation of coulisse mechanisms using the SolidWorks Motion Analysis tool for computer aided design. The analysis of the kinematic parameters of the Scotch Yoke mechanism was carried out by demonstrating the methods of studying the kinematic parameters of the Scotch Yoke mechanism using the analytical method and digital modelling. The results of the study are expressed in kinematic diagrams showing the variation of the velocity, acceleration and displacement of the mechanism's output link with time.

Learning the kinematic analysis of mechanisms using computer-aided design systems provides students with valuable design skills, improves their understanding of how mechanisms work, facilitates the understanding and interpretation of the results, and helps them to visualise complex motion processes that are difficult to understand from static diagrams. This method of study deepens theoretical knowledge, engages students in practical, real-world situations and motivates them to gain the experience needed to become a modern engineer.

