

Rīgas 64. vidusskola

Holla efekta taustiņu pielietojums biometriskajā identifikācijā

Zinātniskās pētniecības darbs
inženierzinātnēs un tehnoloģijās

Darba autors:

Rīgas 64. vidusskolas 12. klases skolnieks
Horens Kokins

Darba vadītājs:

Rīgas 64. vidusskolas direktors, robotikas skolotājs
Edgars Zīverts

Rīga 2026

Anotācija

Zinātniski pētniecisko darbu “Holla efekta taustiņu pielietojums biometriskajā identifikācijā” izstrādāja Rīgas 64. vidusskolas 12. INZ klases skolnieks Horens Kokins.

Zinātniski pētnieciskais darbs tika veikts ar mērķi izpētīt, vai spiediena dinamikas parametru izmantošana līdzās laika parametriem var uzlabot rakstīšanas dinamikas biometrijas precizitāti. Teorētiskajā daļā tika apskatīti biometriskās identifikācijas veidi, rakstīšanas dinamikas pamatprincipi, Holla efekta sensoru darbība un to pielietojums ievadītācēs. Balstoties uz analizēto un apkopoto informāciju par biometrijas metodēm un sensoru tehnoloģijām, tika izveidots eksperimentāls trīs taustiņu tastatūras prototips, izmantojot *Raspberry Pi Pico 2 W* mikrokontrolieri, *Honeywell SS49E* Holla efekta sensorus un *Wooting Lekker L60* slēdžus, kā arī izstrādāta programmatūra datu iegūšanai, apstrādei un analīzei. Pētnieciskā darba veikšanas laikā tika secināts, ka spiediena dinamikas parametru iekļaušana līdzās laika parametriem uzlabo rakstīšanas dinamikas biometriskās identifikācijas precizitātes potenciālu, tādējādi apstiprinot izvirzīto hipotēzi.

Atslēgas vārdi: biometrija, rakstīšanas dinamika, Holla efekts, tastatūra, identifikācija.

Abstract

The scientific research paper “Application of Hall-effect keys in biometric identification” was prepared by Horens Kokins, a student of the 12th INZ class of Riga Secondary School № 64.

The aim of this study was to investigate whether the inclusion of pressure dynamics alongside time-based parameters can improve the accuracy of keystroke dynamics biometrics. The theoretical part examines types of biometric identification, fundamental principles of keystroke dynamics, the operating principles and applications of Hall-effect sensors in input devices. Based on the analysed literature on biometric methods and sensor technologies, an experimental three-key keypad prototype was developed using a *Raspberry Pi Pico 2 W* microcontroller, *Honeywell SS49E* Hall-effect sensors and *Wooting Lekker L60* switches. Software for data acquisition, processing, and analysis was also implemented. The results indicate that incorporating pressure dynamics parameters alongside time-based parameters increases the potential accuracy of keystroke biometric identification, thereby confirming the proposed hypothesis.

Keywords: biometrics, keystroke dynamics, Hall effect, keyboard, identification.

Saturs

Ievads	1
1. Literatūras apskats	2
1.1 Biometriskās identifikācijas metožu vispārīgs raksturojums un rakstīšanas dinamika kā biometrijas veids	2
1.2 Holla efekta princips, tā darbība un pielietojums mūsdienu tehnoloģijās	3
1.3 Iepriekšēju pētījumu analīze par rakstīšanas dinamikas pētīšanu	4
2. Metožu apraksts.....	5
2.1 . Eksperimentālā prototipa izveide un darbības princips.....	5
2.2 Eksperimenta norise un datu reģistrēšanas process	6
3. Iegūto datu apstrāde un analīze	7
3.1. Datu apstrādes un analīzes metodoloģija	7
3.2. Rezultātu interpretācija un hipotēzes pārbaude	8
Secinājumi	10
Literatūras un izmantoto avotu saraksts	11
Pielikumi	12

Ievads

Mūsdienu digitālajā vidē pieaug pieprasījums pēc drošas un vienlaikus ērtas identifikācijas. Tradicionālās metodes, it īpaši paroles, joprojām tiek plaši izmantotas, taču tās ir pakļautas dažādiem riskiem, piemēram, datu noplūdēm, atkārtotai izmantošanai un sociālajai inženierijai. Arvien biežāk tiek attīstītas un izmantotas biometriskās pieejas, kas var nodrošināt augstāku drošības līmeni (Teh u.c., 2013).

Rakstīšanas dinamika, kā uzvedības biometrijas veids, piedāvā iespēju identificēt lietotāju pēc viņa rakstīšanas paradumiem. Iepriekšējie pētījumi šajā jomā galvenokārt analizē laika parametrus, piemēram, taustiņa nospiešanas ilgumu un intervālus starp nospiedieniem, kas lielā mērā ir saistīts ar tradicionālo tastatūru tehnoloģiskajiem ierobežojumiem. Šajā pētījumā ir plānots uzlabot tradicionālo pieeju rakstīšanas dinamikai izmantojot papildu faktorus - taustiņa nospiešanas dzīluma un spiediena dinamikas datus, ko potenciāli ir iespējams fiksēt ar Holla efekta tastatūrām. Šādu datu izmantošana varētu palielināt rakstīšanas dinamikas potenciālu biometriskajā identifikācijā, jo lietotāja rakstīšanas paradumi tiktu analizēti pilnvērtīgāk.

Darba mērķis: Noskaidrot vai taustiņa nospiešanas dzīluma un spiediena dinamikas datu izmantošana līdzās laika parametriem var uzlabot rakstīšanas biometriskās identifikācijas precizitāti.

Darba uzdevumi:

1. Izpētīt Holla efekta taustiņu darbības principu un to potenciālu biometriskajā autentifikācijā;
2. Izveidot eksperimentālu prototipu ar trīs taustiņiem, izmantojot *Honeywell SS49E* sensorus, *Wooting Lekker L60* slēdžus un *Raspberry Pi Pico 2 W* mikrokontrolieri;
3. Apkopot un analizēt vairāku lietotāju datus, rezultātus attēlojot grafiski;
4. Salīdzināt iegūtos datus, lai izvērtētu, vai starp lietotājiem pastāv pietiekamas atšķirības identifikācijai, un papildu parametri var uzlabot identifikācijas precizitāti.

Hipotēze: Nemot vērā, ka katram lietotājam ir unikāli rakstīšanas paradumi un ka Holla efekta taustiņi spēj ar augstu precizitāti fiksēt taustiņa nospiešanas dzīlumu un spiediena dinamikas izmaiņas, papildu parametru iekļaušana līdzās laika parametriem uzlabos lietotāju identifikācijas precizitāti.

Darba izstrādes gaitā teksta stilistikai rediģēšanai, tulkošanai un programmatūras koda optimizācijai tika izmantoti mākslīgā intelekta rīki *ChatGPT* (versija 5.1) un *Gemini* (versija 1.5).

1. Literatūras apskats

1.1 Biometriskās identifikācijas metožu vispārīgs raksturojums un rakstīšanas dinamika kā biometrijas veids

Biometriskā identifikācija tiek definēta kā personas atpazīšanas metode, kas balstās uz individuālām raksturīgām fizioloģiskām vai uzvedības pazīmēm. Jain u.c. (2011, 2) biometriskās sistēmas iedala divās pamatgrupās: fizioloģiskajās metodēs, kurās analizē cilvēka fizioloģiskos parametrus, piemēram, sejas vaibstus, acu varavīksnēni, pirkstu nospiедumus, un uzvedības biometrijā, kas balstās uz personu darbību īpatnībām. Būtiska biometriskās identifikācijas priekšrocība salīdzinājumā ar tradicionālajām autentifikācijas metodēm, piemēram, parolēm vai identifikācijas kartēm, ir tāda, ka biometriskās pazīmes nav iespējams aizmirst, pazaudēt vai tieši nozagt, jo tās ir cieši saistītas ar konkrētu personu (Jain u.c., 2011, 3).

Tomēr fizioloģiskajām biometrijas metodēm bieži ir nepieciešama specializēta aparātūra, tādēļ pētniecībā arvien lielāka uzmanība tiek pievērsta uzvedības biometrijai. Uzvedības biometrijas galvenā priekšrocība ir tāda, ka tai nav nepieciešamas specializētas identifikācijas ierīces, jo datu ievākšana var notikt lietotājam ierastā vidē, izmantojot plaši pieejamas un lietotāja ikdienā izmantotas ierīces (Monrose, 2000, 353; Teh u.c., 2013). Šāda pieeja tiek izmantota mūsdienu digitālās drošības risinājumos, piemēram, uzlabotajās CAPTCHA (Completely Automated Public Turing test to tell Computers and Humans Apart) sistēmās, kur tiek analizēta lietotāja mijiedarbība ar saskarni, tostarp datorpeles kustību trajektorijas un reakcijas laiks. Tomēr šo metožu precīzitāte ir cieši saistīta ar izmantoto ierīču tehniskajām iespējām un sensoru jūtīgumu (Jain u.c., 2011, 7). Tas norāda, ka aparātūras izvēle ir nozīmīga uzticamas biometriskās sistēmas izstrādē.

Rakstīšanas dinamika ir uzvedības biometrijas metode, kas analizē lietotāja rakstīšanas paradumus, tostarp taustiņu nospiešanas ilgumu un laika intervālus starp nospiедieniem. Monrose (2000, 353) pētījumā ir pierādīts, ka šie parametri ir pietiekami individuāli, lai tos varētu izmantot lietotāju identifikācijai. Tomēr lielākā daļa līdzšinējo pētījumu balstās uz laika mērījumiem, jo ar tradicionālām tastatūrām nav iespējams tieši mērīt taustiņu nospiešanas spēku. Šis ierobežojums samazina rakstīšanas dinamikas biometrisko sistēmu potenciālu, jo netiek izmantota visa pieejamā informācija par lietotāja rakstīšanas paradumiem. Tas rada nepieciešamību pēc alternatīviem ievades risinājumiem, kas spēj fiksēt papildu parametrus, piemēram, spiediena raksturielumus.

1.2 Holla efekta princips, tā darbība un pielietojums mūsdienu tehnoloģijās

Holla efekts ir fizikāla parādība, kas izpaužas kā elektriskā sprieguma rašanās vadītajā, ja caur to plūst strāva un vadītājs atrodas magnētiskajā laukā (Lindemuth & Dodrill, 2020). Holla sensora izejas sprieguma vērtība ir atkarīga no magnētiskā lauka stipruma sensora atrašanās vietā, tādējādi iespējams netieši noteikt magnēta relatīvā attāluma izmaiņas ar augstu precizitāti.

Holla efekta sensori tiek iedalīti lineārajos un digitālos sensoros atkarībā no izejas signāla rakstura. Lineārie Holla efekta sensori, piemēram, *Honeywell SS49E*, ġenerē nepārtrauktu analogo signālu, kas mainās proporcionāli magnētiskā lauka intensitātei (Honeywell, 2015). Digitālie Holla efekta sensori, atšķirībā no lineārajiem, nodrošina diskrētu izejas signālu, kas mainās pie noteikta magnētiskā lauka stipruma sliekšņa. ZPD ietvaros piemēroti lineārie Holla efekta sensori, jo tie nodrošina nepārtrauktu signālu, kas ļauj analizēt taustiņa nospiešanas dziļumu un dinamiku.

Mūsdienu tehnoloģijās Holla efekta sensori plaši tiek izmantoti automobiļu sistēmās, rūpnieciskajā automatizācijā, elektromotoru rotora pozīcijas noteikšanai un dažādās elektronikas ierīcēs. Pateicoties bezkontakta darbībai, augstajai izturībai un ilgajam kalpošanas laikam, Holla efekta sensori arvien biežāk tiek izmantoti arī ievadierīču ražošanā, tostarp tastatūrās. Holla efekta taustiņu konstrukcijā parasti tiek izmantots magnēts, kas integrēts taustiņa kustīgajā daļā, un Holla efekta sensors, kas izvietots uz tastatūras plates (Printed Circuit Board). Nospiežot taustiņu, magnēts pietuvojas sensoram, mainās magnētiskā lauka intensitāte vietā, attiecīgi arī sensora izejas spriegums. Ar programmatūras palīdzību šo signālu ir iespējams interpretēt kā taustiņa nospiešanas dziļumu. Šī uzbūve atšķiras no tradicionāli izmantotajiem mehāniskajiem slēdžiem, kuri parasti balstās uz mehānisko kontaktu starp metāla plāksnītēm vai citiem vadošiem elementiem, tādējādi nodrošinot tikai bināru signālu par taustiņa nospiešanu.

1.3 Iepriekšēju pētījumu analīze par rakstīšanas dinamikas pētīšanu

Lai gan rakstīšanas dinamika kā uzvedības biometrijas veids tiek pētīta jau vairākas desmitgades, tā aizvien netiek plaši izmantota autentifikācijā. Fakts, ka šī metode nav guvusi tik plašu pielietojumu, kā paroles vai fizioloģiskā biometrija, norāda to, ka līdzšinējie risinājumi, iespējams, nav pietiekami efektīvi vai precīzi, lai to izmantotu kā uzticamu autentifikācijas risinājumu ikdienā.

Viens no pirmajiem plaši citētajiem pētījumiem par rakstīšanas dinamikas izmantošanu autentifikācijā ir Gaines u.c. (1980) RAND tehniskais ziņojums *“Authentication by Keystroke Timing: Some Preliminary Results”*. Šajā pētījumā autori eksperimentāli pārbaudīja, vai lietotājus iespējams atšķirt pēc tā, kā viņi raksta, nevis ko viņi raksta. Tika analizēti laika raksturlielumi starp secīgiem taustiņu nospiedieniem, izmantojot nelielu profesionālu rakstīšāju grupu un vienādu teksta uzdevumu, ko atkārtoja arī pēc vairākiem mēnešiem. Rezultāti rādīja, ka individuālā rakstīšanas ritmika ir pietiekami raksturīga, lai atšķirtu lietotājus, izveidojot pamatu vēlākajiem pētījumiem par taustiņa turēšanas laika (dwell time) un intervāla starp taustiņu nospiedieniem (flight time) izmantošanu autentifikācijā.

Pisani un Lorena (2013) sistemātiskajā literatūras pārskatā *“A systematic review on keystroke dynamics”* tika apskatīti dažādi pētījumi par rakstīšanas dinamikas izmantošanu lietotāju autentifikācijā. Autori salīdzina, kādas pazīmes tiek izmantotas un kā tiek vērtēta sistēmu precizitāte. Autori norāda, ka pētījumos izmantoto datu daudzums un uzbūve ir ļoti atšķirīgi, tādēļ salīdzināt rezultātus nav vienkārši. Tika uzsvērts, ka efektivitāti visvairāk ietekmē datu apjoms un daudzveidība – jo vairāk un daudzveidīgāku datu ir pieejams par katru lietotāju, jo drošāk ir iespējams raksturot lietotāja rakstīšanas stilu un uzlabot atpazīšanas precizitāti. Līdzīgu secinājumu par datu apjoma un metodikas nozīmi izsaka arī Shanmugapriya un Padmavathi (2009, 116-117).

Zinātniskajā literatūrā ir redzams, ka šo pieeju lielā mērā nosaka tradicionālo tastatūru tehniskie ierobežojumi. Lielākā daļa pētījumu balstās uz notikumu laiku reģistrēšanu tradicionālo mehānisko slēdžu tehnoloģisko limitāciju dēļ.

Krombholz u.c. (2016) pētījumā *“Use the Force: Evaluating Force-Sensitive Authentication for Mobile Devices”* tika izmantots telefona iPhone 6s 3D Touch spiedienjūtīgais ekrāns, lai PIN ievadei pievienotu papildu raksturlielumu – taustiņa nospiešanas spēku. Katram ievadītajam ciparam vienlaikus tika reģistrēts pievadītais spiediens un laika raksturlielumi, izveidojot tā dēvētos “force-PINs”, kas kalpo kā papildu identifikācijas pazīme. Pētījumā autori salīdzināja klasiskos PIN un “force-PINs” un secināja, ka 3D Touch spiediena datu izmantošana ievērojami palielina PIN kombināciju teorētisko drošību, nepasliktinot ievades ērtumu lietotājam.

Apkopojot iepriekšējo pētījumu rezultātus tika secināts, ka rakstīšanas dinamikas biometrijas kvalitāti lielā mērā ietekmē izmantoto parametu daudzveidība un pieejamais datu apjoms. Šī iemesla dēļ, pētījuma ietvaros līdzās laika raksturlielumiem tika izmantoti arī dati par taustiņa nospiešanas dziļumu un raksturu, kā arī katram dalībniekam tika reģistrēti pietiekami liels nospiedienu skaits, lai nospiedienu stils tiktu raksturots precīzāk.

2. Metožu apraksts

2.1. Eksperimentālā prototipa izveide un darbības princips

Pētījuma ietvaros tika izstrādāts eksperimentāls trīs taustiņu Holla efekta tastatūras prototips. Pilna izmēra tastatūras izveide netika paredzēta, lai nepamatoti nepalielinātu izstrādes sarežģītību un izmaksas, jo pētījuma mērķi ir iespējams sasniegt, izmantojot mazāka mēroga risinājumu.

Prototipa izstrādei tika izvēlti trīs lineārie Holla efekta sensori *Honeywell SS49E* un trīs *Wooting Lekker* Holla efekta slēdži. Pētījumam tika izvēlti lineārie *Honeywell SS49E* sensori, jo to radītais analogais signāls mainās proporcionāli magnētiskā lauka intensitātei, nodrošinot nepārtrauktu taustiņa nospiešanas dziļuma mērišanu, kas ir svarīgi spiediena dinamikas analīzei. Jāmin, ka ir iespējams izmantot jebkādu Holla efekta slēdzi, kura konstrukcijā magnēts pārvietojas lineāri attiecībā pret sensoru. Šajā darbā tika izmantoti *Wooting Lekker* slēdži, jo tie ir plašāk izmantotie slēdži Holla efekta tastatūrās, ļaujot pētījumā iegūtos rezultātus uzskatīt par attiecīnāmiem uz plaši pieejamām komerciālajām tastatūrām un pamatot šīs biometrijas potenciālu ieviešanai patēriņtāju ierīcēs.

Lai imitētu standarta tastatūras pamatrindu un ierobežotu mainīgo faktoru skaitu, prototips sastāv no trīs horizontāli izvietotiem taustiņiem. Šāds tehniskais risinājums ļauj veikt paredzētos uzdevumus un iegūt precīzus datus, vienlaikus samazinot mainīgo faktoru skaitu, kas varētu ietekmēt pētījuma rezultātus (Teh u.c., 2013, 5).

Lai nodrošinātu sensoru un magnētu precīzu savstarpējo novietojumu un novērstu mehāniskas nobīdes eksperimenta laikā, tika izstrādāts un ar 3D printeri izgatavots korpus (skatīt 1. pielikuma 1. attēlu). Korpus sastāv no apakšējās daļas, kas satur sensorus un komponentes, un augšējās plāksnes, kur tiek ievietoti slēdži.

Katrs no trim *Honeywell SS49E* sensoriem tika pieslēgts mikrokontroliera *Raspberry Pi Pico 2 W* atsevišķai analogciparu pārveidotāja (ADC) kanālam, nodrošinot trīs neatkarīgu signālu vienlaicīgu nolasīšanu (skatīt 1. pielikumu). Lai mazinātu barošanas sprieguma trokšņu ietekmi uz mēriņumiem, sensoriem tika nodrošināta kopīga barošanas līnija ar vienotu zemējumu. Lai nodrošinātu precīzu datu nolasīšanu, mikrokontroliera programmatūrā tika implementēts eksponenciālā slīdošā vidējā (EMA) filtrs ar koeficientu $\alpha=0,15$, kas ļauj samazināt sensoru signāla troksni aparātūras līmenī, pirms dati tiek nosūtīti uz datoru.

Prototipa darbības princips balstās uz magnēta un sensora relatīvā attāluma izmaiņām taustiņa kustības laikā. Magnēts, kas integrēts taustiņa kustīgajā daļā, nospiešanas brīdī pietuvojas Holla sensoram, izraisot magnētiskā lauka intensitātes pieaugumu un attiecīgi atbilstošas sensora izejas sprieguma izmaiņas. Mikrokontrolieris nolasa šo analogo spriegumu un pārveido digitalā signālā turpmākai datu apstrādei. Izmantojot izstrādāto programmatūru, signāls tiek mērogots un interpretēts kā nospiešanas dziļuma izmaiņas laikā, tādējādi iegūstot unikālu nospiešanas profili katram taustiņam.

Papildus nospiešanas dziļumam, izstrādātais prototips ļauj reģistrēt arī laika raksturlielumus — taustiņa turēšanas ilgumu (dwell time) un intervālus starp secīgiem nospiedieniem (flight time). Tas sniedz iespēju salīdzināt klasiskos rakstīšanas dinamikas rādītājus ar Holla sensoru sniegtu papildu informāciju par spiediena intensitāti, nospiešanas dziļumu un taustiņa atlaišanas ātrumu.

2.2 Eksperimenta norise un datu reģistrēšanas process

Pētījuma praktiskās daļas veikšanai tika izmantota ērtā izlase, piesaistot dalībniekus no autora sociālā loka un Rīgas 64. vidusskolas skolēnu kopienas. Tika iekļauti tikai dalībnieki, kuri apstiprināja, ka izmanto tastatūru ikdienā, nodrošinot, ka dalībniekiem ir raksturīgi rakstīšanas paradumi. Šāda atlases metode tika izvēlēta ķemot vērā pētījuma resursus, kā arī nepieciešamību veikt eksperimentu klātienē, izmantojot specifisku aparātu.

Pirms eksperimenta uzsākšanas visi pētījuma dalībnieki tika iepazīstināti ar darba mērķi, eksperimenta norisi, kā arī tika informēti par datu anonimitāti, brīvprātību, kādi dati tiks reģistrēti un kā tie tiks izmantoti. No katras dalībnieka tika saņemta piekrišana dalībai pētījumā un datu apstrādei (*veidlapas paraugs pieejams 2. pielikumā*).

Eksperiments tika veikts klusā telpā, kur dalībnieks apsēdās pie datora, kuram pievienots iepriekš aprakstītais trīs taustiņu prototips. Pirms datu ievākšanas, izmantojot autora izstrādāto programmatūru, tika veikta taustiņu kalibrēšana. Tās laikā programma fiksēja sensoru miera stāvokļa un maksimālā nospiediena vērtības, lai nodrošinātu precīzu turpmāko mērījumu interpretāciju. Dalībniekiem mutiski tika izstāstītas instrukcijas, kā tika dota iespēja veikt izmēģinājuma nospiedienus. Dalībniekiem tika lūgts sev ierastā tempā un ritmā 10 reizes nospiest trīs taustiņu secību 1-2-3 un 10 reizes secību 3-2-1. Šo procesu katrs dalībnieks atkārtoja 10 reizes ar atpūtas intervāliem.

Datu reģistrēšanai tika izveidota grafiskā saskarne *Python* vidē, izmantojot *Tkinter* bibliotēku. Programmatūra nodrošina automatizētu lietotāju profilu izveidi, savienojuma pārvaldību un datu saglabāšanu CSV (Comma-Separated Values) formātā. Katrs ieraksts satur laika zīmogu mikrosekundēs un trīs normalizētās sensoru vērtības.

3. Iegūto datu apstrāde un analīze

3.1. Datu apstrādes un analīzes metodoloģija

Datu apstrādei un analīzei tika izmantota programmēšanas valoda *Python* un datu analīzes bibliotēkas *Pandas*, *NumPy* un *SciPy* (*programmatūras pirmkods un dati pieejami 2. pielikumā*).

Primārā trokšņu mazināšana tika veikta mikrokontroliera līmenī izmantojot eksponenciālā slīdošā vidējā (Exponential Moving Average, EMA) filtru ar koeficientu $\alpha = 0,15$. Šāda pieeja nodrošināja, ka uz datu ieguves programmu tika nosūtīti jau daļēji stabilizēti mēriņumi, samazinot augstfrekvences trokšņu ietekmi turpmākajā apstrādē.

Sekundārajai signāla izlīdzināšanai tika izmantots Savicka-Goleja filtrs, kas tika implementēts ar *SciPy* bibliotēkas palīdzību. Šāda filtrēšanas metode tika izvēlēta, jo tā efektīvi izlīdzina augstfrekvences trokšņus, vienlaikus saglabājot signāla formas īpašības, piemēram, lokālos maksimumus, minimumus vērtības un straujas pārejas. Šo īpašību saglabāšana ir būtiska veicot turpmākos aprēķinus.

No iegūtajiem sensora pozīcijas datiem $x(t)$ tika matemātiski atvasināti dinamiskie raksturlielumi - ātrums un paātrinājums, izmantojot skaitlisko diferenciāciju ar funkciju *NumPy.gradient*:

$$v(t) = \frac{\Delta x}{\Delta t}, \quad a(t) = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

Katra taustiņa nospiediena identificēšanai tika izmantota sliekšņa metode, par nospiedienu uzskatot signālu, kas pārsniedz 5% no sensora darbības diapazona. Katram identificētajam nospiedienam tika aprēķinātas un saglabātas septiņas biometriskās pazīmes:

1. nospiediena kopējais ilgums,
2. maksimālais sasniegtais taustiņa dzīlums,
3. maksimālais kustības ātrums,
4. maksimālais paātrinājums,
5. laukums zem nospiediena līknes, kas raksturo kopējo ieguldīto enerģiju,
6. laiks no nospiediena sākuma līdz maksimālajam dzīlumam,
7. laiks no maksimālā dzīluma līdz pilnīgai taustiņa atlaišanai.

Iegūto biometrisko pazīmu kvalitātes un lietojamības novērtēšanai tika izmantotas iekšējās korelācijas koeficiente (Intraclass Correlation Coefficient, turpmāk ICC) un vienfaktora dispersijas analīzes (Analysis of Variance, turpmāk ANOVA) metodes.

ICC tika izmantots, lai novērtētu pazīmu stabilitāti viena lietotāja ietvaros. Pētījumā tika izmantota ICC(3,k) modifikācija, kas raksturo mēriju savstarpējo saskaņotību skalā no 0 līdz 1, kur vērtības, kas tuvojas 1, norāda uz augstu mēriju stabilitāti.

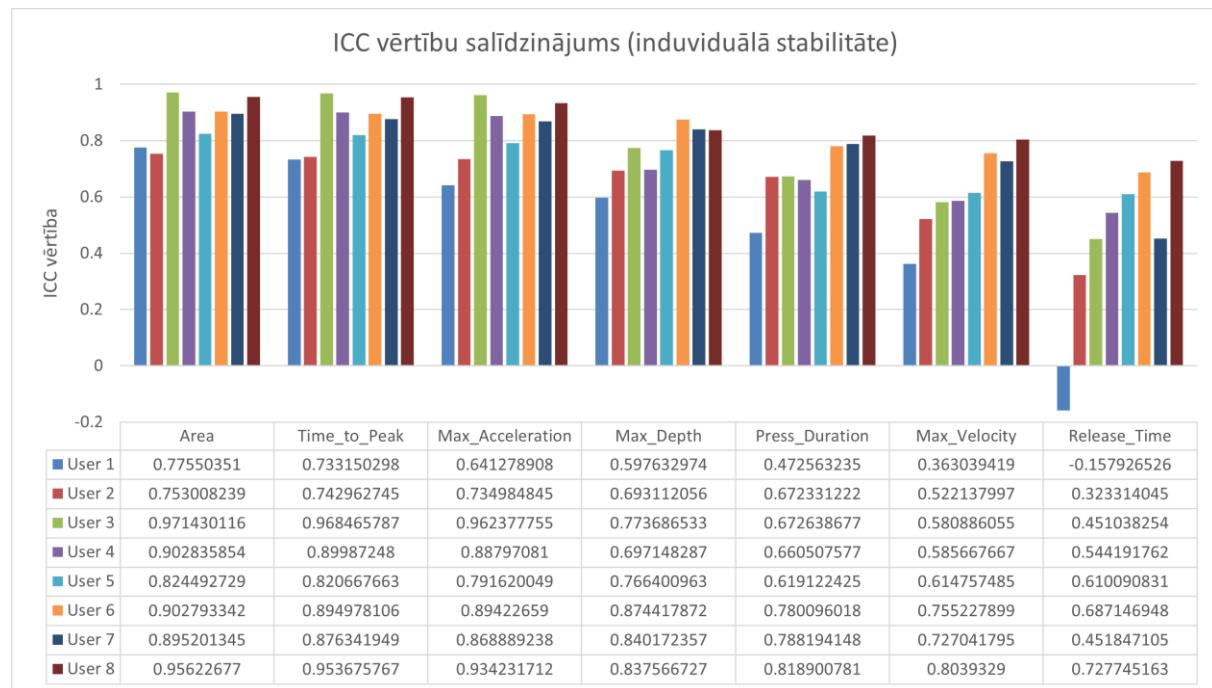
ANOVA tika izmantota, lai izvērtētu sistēmas spēju atšķirt dažādus lietotājus, salīdzinot pilnu datu izkliei starp lietotāju grupām. Galvenais analīzes rādītājs ir Fišera kritērijs (F-vērtība), kur lielākas F-vērtības norāda uz lielāku atšķirību starp lietotājiem un līdz ar to uz augstāku iespēju identificēt lietotāju pēc attiecīgās pazīmes.

3.2. Rezultātu interpretācija un hipotēzes pārbaude

Veiktā datu analīze ļāva izvērtēt Holla efekta sensoru potenciālu rakstīšanas biometriskajā identifikācijām atklajot būtiskas atšķirības starp dažādiem rakstīšanas dinamikas parametriem.

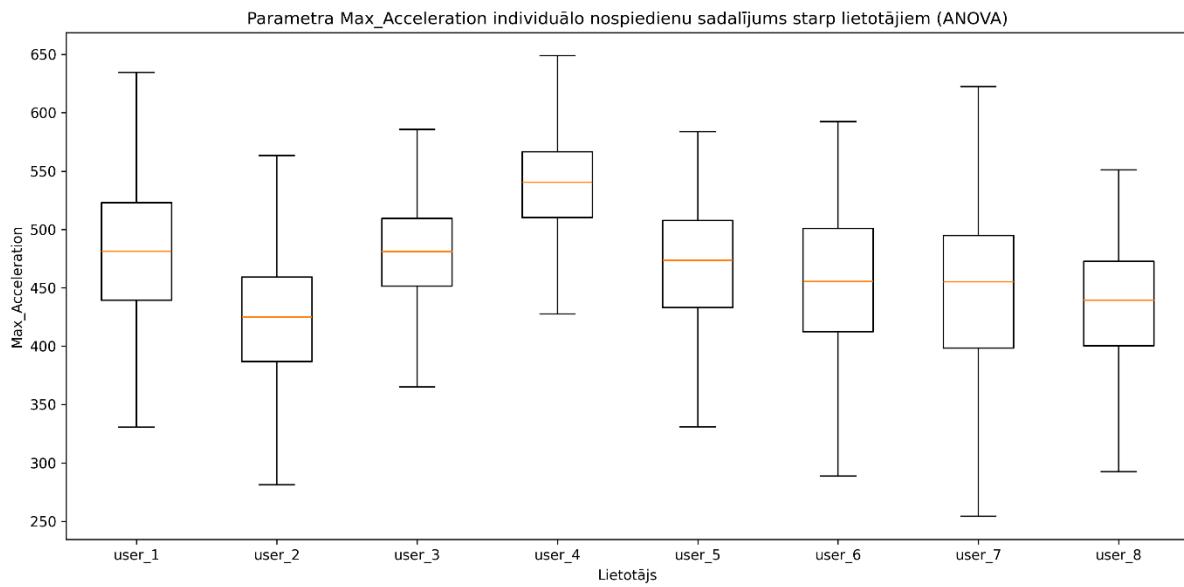
Analizējot ICC rezultātus, tika konstatēts, ka lietotāju rakstīšanas ritms ir ievērojami stabilāks par spēka pielietojumu. Visaugstāko stabilitāti uzrādīja laiks līdz maksimālajam dziļumam un laukums zem līknēs, jeb pielietotā enerģija, kur ICC vērtības vairumam lietotāju pārsniedza 0,8, atsevišķos gadījumos sasniedzot pat 0,97. Tas norāda, ka veids, kā lietotājs sadala spiedienu laikā, ir ļoti noturīgs paradums. Pretēji tam, maksimālais dziļums uzrādīja ievērojami zemāku stabilitāti, kas skaidrojams ar to, ka cilvēks katru reizi nospiež taustiņu ar nedaudz atšķirīgu spēku.

1. Attēls. Rakstīšanas dinamikas parametru ICC vērtību salīdzinājums starp lietotājiem



Iegūtie ANOVA rezultāti apstiprināja hipotēzi par dinamikas parametru izmantošanu lietotāju atšķiršanā. Lai gan spēka parametri lietotājiem nebija stabilākie, salīdzinot lietotajus savā starpā, tie izrādījās unikālākie. Vislielākās atšķirības uzrādīja maksimālais paātrinājums, kura Fišera kritērija vērtība sasniedza $F \approx 277$. Tas ir ievērojami augstāk nekā rakstīšanas dinamikā bieži izmantotajam nospiedienam (dwell time), kura $F \approx 170$.

2. Attēls. Rakstīšanas dinamikas maksimālā paātrinājuma individuālo nospiedienu sadalījums starp lietotājiem



Iegūtie rezultāti norāda, ka Holla efekta sensoru izmantošana rakstīšanas dinamikas pētījumos ļauj iegūt biometriskos parametrus, kas nav pieejami tradicionālajās tastatūrās. Tieši parametri, piemēram, paātrinājums un laukums zem nospiediena līknes, sniedz lielāko ieguldījumu lietotāju atšķiršanā. Visefektīvākā biometriskā sistēma rodas, kad tiek apvienoti augstas stabilitātes parametri, piemēram, laika rādītāji, ar augstas atšķirtspējas parametriem.

Secinājumi

1. Izstrādātais trīs taustiņu prototips apstiprināja, ka lineārie Holla efekta sensori spēj nodrošināt nepārtrauktu taustiņa nospiešanas dziļuma reģistrāciju.
2. ICC analīze liecina, ka laika un enerģijas raksturlielumi – laiks līdz maksimālajam dziļumam, nospiešanas ilgums un laukums zem nospiediena līknes – uzrāda ievērojami augstāku stabilitāti nekā maksimālais nospiešanas dziļums. Tas norāda uz šo parametru piemērotību individuālo rakstīšanas paradumu identificēšanai.
3. Individuālo nospiedienu ANOVA analīze atklāja, ka dinamiskie spēka parametri, īpaši maksimālais paātrinājums, nodrošina augstāko izšķirtspēju lietotāju noteikšanā, pārspējot tradicionāli izmantotos laika parametrus.
4. Tika konstatēts, ka atsevišķi raksturlielumi, piemēram, taustiņa atlaišanas laiks, uzrāda zemu vai pat negatīvu stabilitāti ($ICC < 0$). Tas norāda uz to ierobežotu piemērotību biometriskajai identifikācijai un akcentē nepieciešamību veikt rūpīgu pazīmju atlasi.
5. Pētījumā izstrādātais prototips un datu apstrādes metodika var tikt izmantota kā pamats turpmākiem pētījumiem lielāka mēroga Holla efekta tastatūru biometriskās identifikācijas sistēmu izstrādē.

Literatūras un izmantoto avotu saraksts

- Gaines, R. S., Lisowski, W., Press, J., & Shapiro, N. (1980). *Authentication by Keystroke Timing: Some Preliminary Results*. RAND Report R-256-NSF. Santa Monica: RAND Corporation.
- Google. (2026, 11. janvāris). *Gemini 1.5 Saruna par koda optimizāciju Python vide* [tiešsaiste]. [skatīts 2026. gada 11. janvārī] Pieejams: <https://gemini.google.com/>
- Honeywell. (2015). *SS39ET/SS49E/SS59ET Series: Linear Hall-effect Sensor ICs* [tiešsaiste]. Honeywell [skatīts 2025. gada 6. novembrī]. Pieejams: <https://prod-edam.honeywell.com/content/dam/honeywell-edam/sps/siot/fr-fr/products/sensors/magnetic-sensors/linear-and-angle-sensor-ics/common/documents/sps-siot-ss39et-ss49e-ss59et-product-sheet-005850-3-en-ciid-50359.pdf>
- Jain, A. K., Ross, A., & Nandakumar, K. (2011). *Introduction to Biometrics*. New York: Springer. 315 p.
- Krombholz, K., Hupperich, T., & Holz, T. (2016). Use the Force: Evaluating Force-Sensitive Authentication for Mobile Devices. *SOUPS '16: Proceedings of the Twelfth USENIX Conference on Usable Privacy and Security* (207-219). Denver, CO: USENIX Association.
- Lindemuth, J., & Dodrill, B. (2020). *Hall Effect Measurement Handbook* [tiešsaiste]. Lake Shore Cryotronics [skatīts 2025. gada 6. novembrī]. Pieejams: https://qdusa.com/siteDocs/productBrochures/Lake_Shore_Hall_Effect_Handbook.pdf
- Monrose, F. (2000). Keystroke dynamics as a biometric for authentication. *Future Generation Computer Systems*, 16(4), 351–359.
- OpenAI. (2026, 11. decembris). *ChatGPT-5 Saruna par teksta stilistisko redīģēšanu un tulkošanu* [tiešsaiste]. [skatīts 2026. gada 11. janvārī]. Pieejams: <https://chat.openai.com/>
- Pisani, P. H., & Lorena, A. C. (2013). A systematic review on keystroke dynamics. *Journal of the Brazilian Computer Society*, 19(4), 573–587.
- Raspberry Pi Ltd. (2024). *Raspberry Pi Pico 2 W Datasheet* [tiešsaiste]. Raspberry Pi Ltd [skatīts 2025. gada 11. decembrī]. Pieejams: <https://datasheets.raspberrypi.com/pico/pico-2-w-datasheet.pdf>.
- Shanmugapriya, D., & Ganapathi, P. (2009). A Survey of Biometric keystroke Dynamics: Approaches, Security and Challenges. *International Journal of Computer Science and Information Security*, Vol 5, No. 1.
- Teh, P. S., Teoh, A. B., & Yue, S. (2013). A Survey of Keystroke Dynamics Biometrics. *The Scientific World Journal*, 2013.
- Wooting. (2025). *L60 Magnetic Hall Effect Switch* [tiešsaiste]. Wooting [skatīts 2025. gada 6. novembrī]. Pieejams: <https://wooting.io/product/lekker-switch-linear60?Size=12+pack>

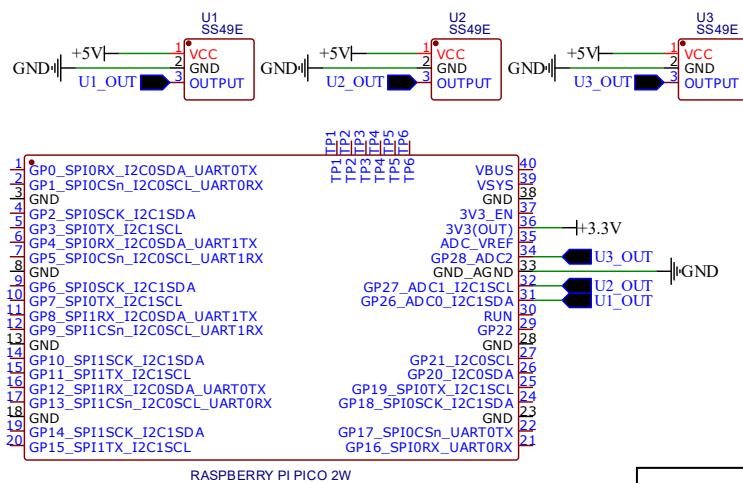
Pielikumi

1. Pielikums. Attēli ar izveidoto prototipu.

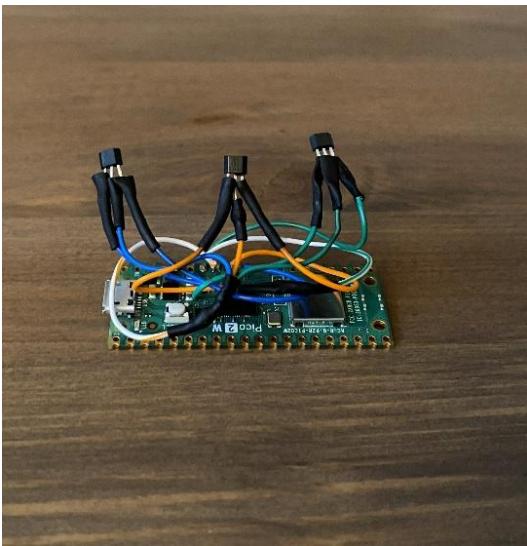
1. Attēls. 3D printētais rāmis.



2. Attēls. Elektriskā slēguma shēma



4. Attēls. Pabeigts slēgums



3. Attēls. Pabeigts 3 taustīju tastatūras prototips



2. *Pielikums.*

Zinātniskās pētniecības darba programmatūras pirmkods, 3D modeļa fails, eksperimenta dati, un informētās piekrišanas veidlapas parauga GitHub repozitorijā. Pieejams: <https://github.com/horens101/ZPD>

3. *Pielikums. Informētās piekrišanas veidlapas paraugs.*

Piekrišana dalībai pētījumā “Holla efekta taustīņu pielietojums biometriskajā identifikācijā”

Aicinām Jūs piedalīties pētījumā “Holla efekta taustīņu pielietojums biometriskajā identifikācijā” ko veic Rīgas 64. vidusskolas 12. klases skolēns Horens Kokins. Vēlamies Jūs iepazīstināt ar pētījuma mērķi, norisi un saturu. Pirms šī dokumenta parakstīšanas rūpīgi izlasiet visu informāciju! Pirms dokumenta parakstīšanas Jums ir tiesības uzdot jautājumus par pētījumu un saņemt uz tiem atbildes.

Pētījuma mērķis:

Pētījuma mērķis ir noskaidrot vai taustīņa nospiešanas dzīluma un spiediena dinamikas datu izmantošana līdzās laika parametriem var uzlabot rakstīšanas biometriskās identifikācijas precīzitāti.

Pētījuma norise:

Pētījums notiek Rīgas 64. vidusskolas telpās, izmantojot eksperimentālu trīs taustīņu Holla efekta tastatūras prototipu.
Pētījuma dalībniekiem būs jāveic vairāki īsi rakstīšanas uzdevumi, nospiežot trīs taustīņus noteikta secībā. Pētījuma laikā tiks reģistrēti taustīņu nospiešanas laiki un dzīluma raksturlielumi.

Dalība pētījumā aizņem aptuveni 5–10 minūtes.

Ieguvumi un riski

Pētījuma riski ir minimāli. Iespējams neliels fizisks diskomforts pirkstu noguruma dēļ vai psiholoģisks diskomforts saistībā ar uzdevuma izpildi. Ja dalībnieks izjūt diskomfortu, viņš jebkurā brīdī var pārtraukt dalību.

Konfidencialitāte un personas datu aizsardzība:

Pētījuma gaitā netiek iegūti personas identificējoši dati (vārds, uzvārds, personas kods, fotogrāfijas, audio vai video ieraksti).
Katram dalībniekam tiek piešķirts kods, un visi dati tiek apstrādāti anonimizētā veidā.

Iegūtie dati tiek izmantoti tikai pētījuma mērķiem, uzglabāti digitālā formā autora datorā un pēc pētījuma noslēguma tiek arhivēti ne ilgāk kā 12 mēnešus.
Rezultāti tiek publicēti tikai apkopotā veidā, bez iespējas identificēt konkrētu personu.

Brīvprātīga piedalīšanās:

Piedalīšanās šajā pētījumā ir brīvprātīga. Jums ir tiesības atteikties piedalīties pētījumā vai pārtraukt dalību pētījumā jebkurā laikā.

Pētnieks var pārtraukt dalībnieka dalību pētījumā gadījumā, ja netiek ievēroti uzdevuma izpildes nosacījumi vai ja dalībnieks izjūt būtisku diskomfortu.

Ja Jums ir jebkādi jautājumi par šo pētījumu, lūdzu, sazinieties ar Horens Kokins, Rīgas 64. vidusskola
E-pasts: horens35@gmail.com

Šis dokuments ir sastādīts divos eksemplāros, no kuriem viens atrodas pie pētījuma veicēja, bet otrs – pie pētījuma dalībnieka.

Ei ar savu parakstu apstiprinu, ka:

- 1) esmu iepazinies/ -usies ar šajā dokumentā iekļauto informāciju par pētījumu un saprotu pētījuma būtību, mērķi, norisi, riskus un ieguvumus;
- 2) man bija iespēja uzdot jautājumus par pētījumu, un uz maniem jautājumiem ir sniegtas atbildes;
- 3) es saprotu, ka mana dalība šajā pētījumā ir brīvprātīga un atteikšanās piedalīties pētījumā vai dalības pārtraukšana neizraisīs nekādas nelabvēlīgas sekas;
- 4) es esmu informēts/a par personas datu apstrādes mērķi un paredzamo personas datu apstrādes apjomu;
- 5) es piekrītu, ka šī pētījuma laikā atbilstoši normatīvo aktu prasībām tiek iegūti, uzglabāti un apstrādāti mani personas dati, kuri ir minēti informācijā par pētījumu;
- 6) es piekrītu piedalīties šajā pētījumā.

Pētījuma dalībnieka vārds, uzvārds	
Paraksts	
Datums	
Pētnieka vārds, uzvārds	
Paraksts	
Datums	