

PÖÖRDEL LIIKUVALE RATASMASINALE MÕJUV KÜLGJÕUD

T. Sõõro

SUMMARY: Lateral force applied to a wheeled machine on turning. *The lateral force calls forth unstability of tractors and propelled farm machines on turnings. At the curvilinear motion the lateral force results from the centrifugal force and in the case of speed variation it results from the force of inertia (Figure 1).*

A computational experiment is used to research the variation of the lateral force and the factors having an effect upon it. A classic tractor with the front steerable wheels is considered as a simple planar solid. The lateral force applied to the tractor is computed at two manoeuvres: at turning and in the case of changing the lane. The steerable wheel turning angle is considered to vary sinusoidally (Figure 2).

The results of the computation indicate, that in case of movement with the constant speed the lateral force varies respectively to variation of the steerable wheels turning angle. Acceleration increases the lateral force while the maximum of the lateral force is postponed with respect to the maximum of the steerable wheel turning angle. In the case of decelerated movement the lateral force decreases and obtains its maximum with anticipation when compared to the maximum of the steerable wheel angle.

The steerable wheel turning angle and the speed of tractor have the most essential effect upon the lateral force (Figures 3,4 and 6). The constructive and exploitation parameters, like mass, axle base, lateral co-ordinate of the centre of gravity also have effect on the lateral force.

The lateral force applied to the tractor consists of three components (Formulae 11 and 12). The component F_1 of the lateral force caused by the centrifugal force makes up the dominating part of the lateral force. In the case of low speed the component F_2 of the lateral force caused by the variation of the speed may appear comparable with the component F_1 caused by the centrifugal force (Figure 7).

Sissejuhatus

Küllaltki sageli esinevateks õnnetusteks on ratasmasinate – traktorite, autode, põllumajanduslike liikurmasinate (edaspidi lühidalt traktorite) – küglibisemine ja ümberminek pööretel. Traktori liikumise muudab pöördel ebapüsivaks masina pikitelje suhtes risti mõjuv külgjõud. Kõverjoonelisel liikumisel on külgjõu allikateks inertsijõud. Pöördel liikumisel muutuvad traktori juhtrataste pöördenurk, liikumistrajektoori raadius ning tavaliselt ka liikumiskiirus (isegi juhul, kui juht gaasipedaali asendit ja mootori pöördemomenti ei muuda, väheneb pöördel liikumiskiirus suurenenud liikumistakistuse tõttu), ühtlasi muutuvad inertsijõud.

Alljärgnevalt on püütud lihtsa mudeli ja arvutusliku eksperimendi abil uurida külgjõu muutumist traktori liikumisel pöördel ja lihtsamatel manöövritel, hinnata külgjõudu mõjutavaid tegureid, kriitilisi hetki ja riski vähendamise võimalusi.

Uurimismetoodika

Külgjõu muutumise uurimiseks liikumissuuna muutmisel on kasutatud arvutuslikku eksperimenti. Lihtsa ja töökindla mudeli saamiseks on klassikalist esi-juhtratastega traktorit vaadeldud tasapinnalise kehana. Ei ole arvestatud kere kaldumist ja koormuse ümberjaotumist sisemistelt ratastelt välimistele pöördel liikumisel. Samuti ei ole arvestatud rehvide deformatsioone ja rataste kõrvalejooksu ning on eeldatud, et rattale rakenduvad jõud ei ületa haardumisjõudu ja rattad veerevad ilma libisemata. Nimetatud lihtsustustest tingitud vead on piisavalt väheolulised külgjõu muutumise kõige olulisemate seaduspärasuste hindamisel.

Traktori kõverjoonelisel liikumisel on tema raskuskeskmesse rakendatud tsentrifugaaljõud F_T (joon. 1a). Tsentrifugaaljõu põiksuunalise (traktori pikiteljega risti oleva) komponendi F_{k1} võime avaldada:

$$F_{k1} = F_T \cdot \cos \gamma, \quad (1)$$

kus F_T – traktori raskuskeskmesse rakenduv tsentrifugaaljõud,

$$\cos \gamma = \frac{r}{r_1}, \quad (2)$$

kus r – traktori pikitelje kaugus hetkelisest pöördekeskmest O ,

r_1 – traktori raskuskeskme kaugus hetkelisest pöördekeskmest O .

Traktori raskuskeskmesse mõjuv tsentrifugaaljõud

$$F_T = \frac{m \cdot v_A^2}{r_1}, \quad (3)$$

kus m – traktori mass,

v_A – raskuskeskme kiirus liikumisel ümber hetkelise pöördekeskme O ,

$$v_A = \frac{v}{\cos \gamma}, \quad (4)$$

kus v – traktori liikumiskiirus.

Arvestades avaldisi (2)...(4) saame tsentrifugaaljõust tingitud küljõu avaldada kujul:

$$F_{k1} = \frac{m \cdot v^2}{r}. \quad (5)$$

Kiireneval (aeglustuval) liikumisel rakendub traktori raskuskeskmesse täiendav inertsijõud F_i , mis põhjustab täiendava küljõu F_{k2} (joon. 1b). Küljõu F_{k2} võime avaldada:

$$F_{k2} = F_i \cdot \sin \gamma. \quad (6)$$

Liikumiskiiruse muutumisest tingitud traktori raskuskeskmesse rakenduv inertsijõud

$$F_i = m \cdot \frac{dv_A}{dt}. \quad (7)$$

Jooniselt 1 saame traktori pöörderaadiuse

$$r = \frac{l_b}{\tan \theta}, \quad (8)$$

kus l_b – traktori baas,

θ – juhtrataste pöördenurk.

Traktori raskuskeskme pöörderaadius on siis

$$r_1 = \sqrt{l_A^2 + r^2} = \frac{\sqrt{l_A^2 \cdot \tan^2 \theta + l_b^2}}{\tan \theta}. \quad (9)$$

Võttes arvesse avaldisi (2), (4), (8) ja (9), saame avaldada traktori raskuskeskme liikumiskiiruse v_A traktori liikumiskiiruse v kaudu järgnevalt:

$$v_A = \frac{v}{l_b} \cdot \sqrt{l_A^2 \cdot \tan^2 \theta + l_b^2}.$$

Diferentseerides viimast avaldist, saame

$$\frac{dv_A}{dt} = \frac{1}{l_b} \cdot \left[v \cdot l_A^2 \cdot \tan \theta \cdot \frac{1 + \tan^2 \theta}{\sqrt{l_A^2 \cdot \tan^2 \theta + l_b^2}} \cdot \frac{d\theta}{dt} + \sqrt{l_A^2 \cdot \tan^2 \theta + l_b^2} \cdot \frac{dv}{dt} \right]. \quad (10)$$

Asendades $\frac{dv_A}{dt}$ avaldisse (7), F_i avaldisse (6) ning võttes arvesse, et $\sin \gamma = \frac{l_A}{r_1}$,

saame külgjõu F_{k2} kujul

$$F_{k2} = \frac{m}{l_b} \cdot \left[v \cdot l_A^3 \cdot \tan^2 \theta \cdot \frac{1 + \tan^2 \theta}{l_A^2 \cdot \tan^2 \theta + l_b^2} \cdot \frac{d\theta}{dt} + l_A \cdot \tan \theta \cdot \frac{dv}{dt} \right].$$

Summaarne traktori külgjõud pöördel liikudes on

$$F_k = F_{k1} + F_{k2}$$

ehk

$$F_k = \frac{m}{l_b} \cdot \tan \theta \cdot \left[v^2 + l_A \cdot \frac{dv}{dt} + v \cdot l_A^3 \cdot \tan \theta \cdot \frac{1 + \tan^2 \theta}{l_A^2 \cdot \tan^2 \theta + l_b^2} \cdot \frac{d\theta}{dt} \right]. \quad (11)$$

Avaldise (11) võime kirjutada kujul:

$$F_k = F_1 + F_2 + F_3, \quad (12)$$

kui

$$F_1 = \frac{m}{l_b} \cdot \tan \theta \cdot v^2,$$

$$F_2 = \frac{m \cdot l_A}{l_b} \cdot \tan \theta \cdot \frac{dv}{dt},$$

$$F_3 = \frac{m \cdot l_A^3}{l_b} \cdot v \cdot \tan^2 \theta \cdot \frac{1 + \tan^2 \theta}{l_A^2 \cdot \tan^2 \theta + l_b^2} \cdot \frac{d\theta}{dt}.$$

Paljude uurijate mõõtmised on näidanud, et ratasmasina liikumisel pöördel muutub rooli- ja juhtrataste pöördenuk enam-vähem sinusoidaalselt (joon. 2):

$$\theta = \theta_0 \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (13)$$

kus θ – juhtrataste pöördenuk,

θ_0 – juhtrataste pöördenuka amplituud,

ω – juhtrataste ringsagedus,

$$\omega = 2\pi f; \quad f = \frac{1}{T},$$

f – juhtrataste võnkesagedus (väljapööramise sagedus),

T – juhtrataste võnkeperiood (väljapööramise periood).

Juhtrataste pööramise kiirus on siis

$$\frac{d\theta}{dt} = \theta_0 \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t). \quad (14)$$

Kasutades avaldise (11)...(14) on arvatud traktorile mõjuv külgjõud järgmistel lähtendmetel: traktori mass $m=3600$ kg, baas $l_b=2,37$ m, raskuskeskme pikikoordinaat $l_A=0,875$ m, juhtrataste pöördenuka amplituud $\theta_0 = 0,09$ rad, juhtrataste võnkeperiood $T=8$ s. Traktori liikumiskiirus on võetud ühtlaselt muutuvaks ($v=v_0+a \cdot t$). Traktori liikumise algiiruseks on võetud $v_0=5$ m/s ning kiirendus on võetud piirides $a=\pm(0...0,6)$ m/s².

Traktorile mõjuv külgjõud on arvatud kahel manöövri: pöörde läbimisel ja sõidurea vahetamisel. Viimasena nimetatud manööver esineb takistusest ümbersõidul, möödasõidul, sobiva sõiduraja valimisel enne pööret jne. Pöörde läbimisel muutub juhtrataste pöördenurk sinusoidaalselt poole perioodi kestel: juhtrattad pööratakse pöörde esimesel poolel välja kuni suurima pöördenurgani ning seejärel tagasi otsesõiduasendisse pöörde teisel poolel (joon. 2a). Sõidurea vahetamisel muutub juhtrataste pöördenurk sinusoidaalselt täisperioodi kestel (juhtrattaid pööratakse manöövri esimesel poolel ühes suunas, teisel poolel vastassuunas) (joon. 2b).

Arvutustulemuste analüüs

Traktorile mõjuval külgjõul on kolm komponenti ja põhimõtteliselt oleneb külgjõud kolmest olulisest liikumisrežiimiga seotud tegurist: liikumiskiirusest v , kiirendusest (aeglustusest) $\frac{dv}{dt}$ ja juhtrataste pööramise kiirusest $\frac{d\theta}{dt}$ (avaldis 12). Kõik need tegurid valib juht ja võib öelda, et need olenevad juhtimisstiilist.

Kiirenduse mõju on seda suurem, mida suurem on raskuskeskme pikikoordinaat l_A . Juhtrataste pööramise kiiruse mõju tugevus oleneb peale raskuskeskme pikikoordinaadi veel liikumiskiirusest, juhtrataste asendist ja traktori baasist. Järsk roolipööre mõjutab külgjõudu enam lühikese baasiga traktoril, mille raskuskeskme on nihutatud kaugemale ette.

Traktori liikumisel pöördel püsiva kiirusega muutub külgjõud vastavalt juhtrataste pöördenurga muutumisele. Pöörde läbimisel kiirendusega külgjõud suureneb, kusjuures suurima väärtuse saavutab külgjõud pöörde teisel poolel hiline misega juhtrataste pöördenurga suhtes (joon. 3a). Külgjõu suurim väärtus hilineb seda enam, mida suurem on kiirendus. Aeglustuval liikumisel külgjõud väheneb ja tema suurim väärtus ennetab juhtrataste suurimat pöördenurka (joon. 3b).

Ka sõiduraja vahetamisel (juhtrattaid pööratakse keskasendist välja esialgu ühes suunas, seejärel teises suunas) muutub külgjõud püsiva kiirusega liikudes vastavalt juhtrataste pöördenurgale (joon. 4a). Kiireneval liikumisel suureneb külgjõud eriti manöövri teisel poolel, kui juhtrattaid pööratakse esialgsele vastassuunas. Ka sõidurea vahetamisel hilineb külgjõu suurim väärtus kiireneval liikumisel juhtrataste pöördenurga suhtes. Aeglustuval liikumisel (joon. 4b) väheneb manöövri teisel poolel külgjõud võrreldes esimese poolega ning külgjõu suurim väärtus esineb varem kui ühtlase kiirusega liikumisel.

Mõõduka või suure liikumiskiiruse ning reaalse kiirenduse ja juhtrataste pööramiseks kiiruse korral moodustab valdava osa külgjõust F_k tsentrifugaaljõust tingitud komponent F_1 (joon. 7a). Väikese liikumiskiiruse ja suure kiirenduse korral võib külgjõu F_k kiirendusest tingitud komponendi F_2 osatähtsus suurene da ning osutada võrreldavaks tsentrifugaaljõust tingitud komponendi F_1 omaga (joon. 7b). Külgjõu kolmanda, juhtrataste pööramise kiirusest tingitud komponendi F_3 osatähtsus on ülejäänutega võrreldes väike nii suuritel kui väikestel kiirustel (joon. 7). Juhtrataste pööramise kasvatades tsentrifugaaljõust tingitud külgjõu komponent F_1 juhtrataste pööramiseks kiirusest olenemata kiiresti ning muutub valdavaks.

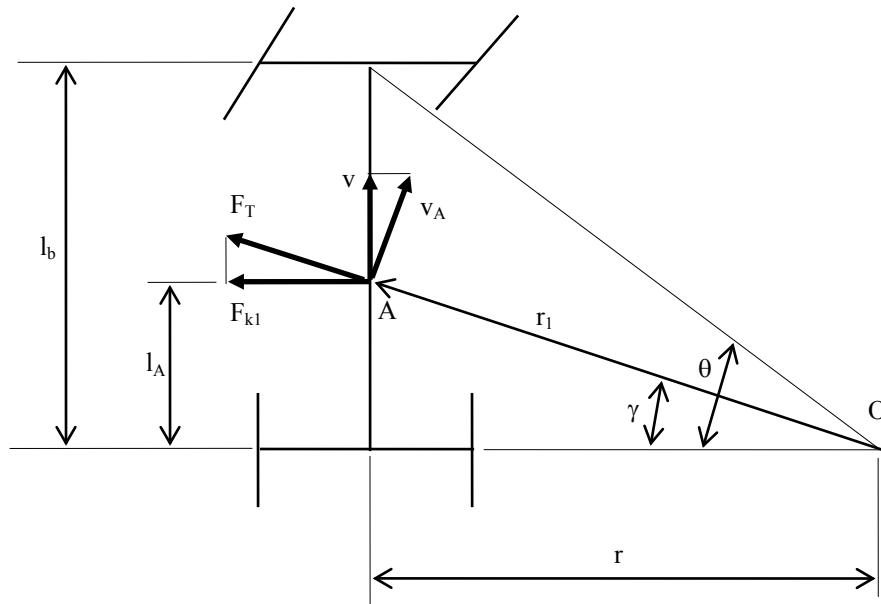
Järeldused

Traktorile (üldjuhul ratasmasinale) kõverjoonelisel liikumisel mõjuv külgjõud oleneb reast teguritest, millest osa (mass, baas, raskuskeskme koordinaat) on seotud traktori tarinduse ja rakendamise ga (agregateerimisega tööseadmetega), osa (liikumiskiirus, kiirendus, juhtrataste pöördenurk) liikumisrežiimiga. Viimasena nimetatud valib juht. Traktori massi vähendamine tagab pöördel liikumisel väiksema külgjõu ja traktori suurema püsivuse (joon. 5). Püsivuse seisukohast on otstarbekas, et traktor omaks võimalikult väikest massi, mis tagaks vajaliku veojõu.

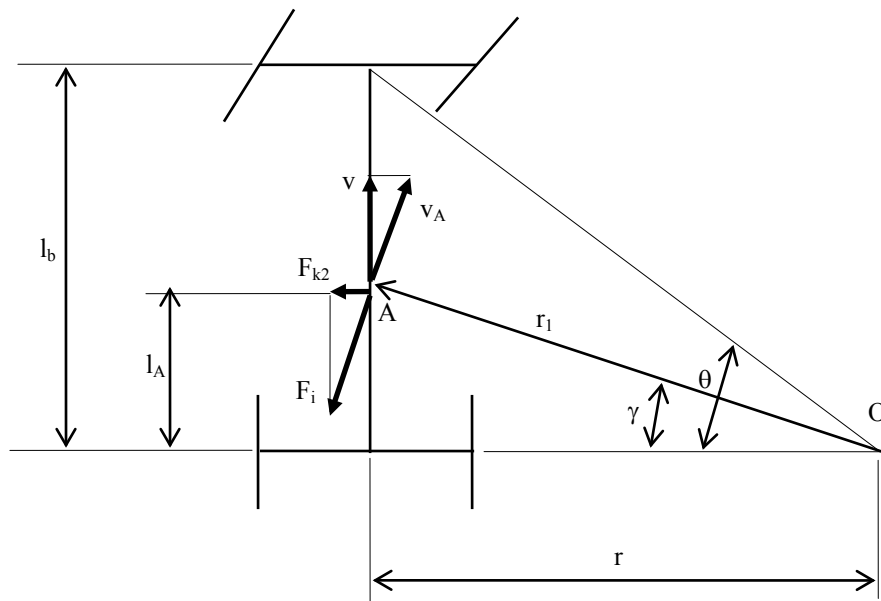
Traktori baasi suurendamine vähendab külgjõudu pöörderaadiuse suurenemise tõttu ning baasi suurendades saadakse suurem püsivus traktori manöövervusvõime arvel.

Traktori agregateerimisel eespaiknevate masinate, riistade või lisaraskustega nihkub raskuskeskme ettepoole, suurendades külgjõudu ja vähendades püsivust pööretel liikumisel.

Oluliselt mõjutab külgjõudu ja traktori püsivust pööretel liikumiskiirus (joon. 6). Sobival valitud liikumiskiirus on kõige olulisem püsivust tagav tegur pööretel liikumisel.



a)



b)

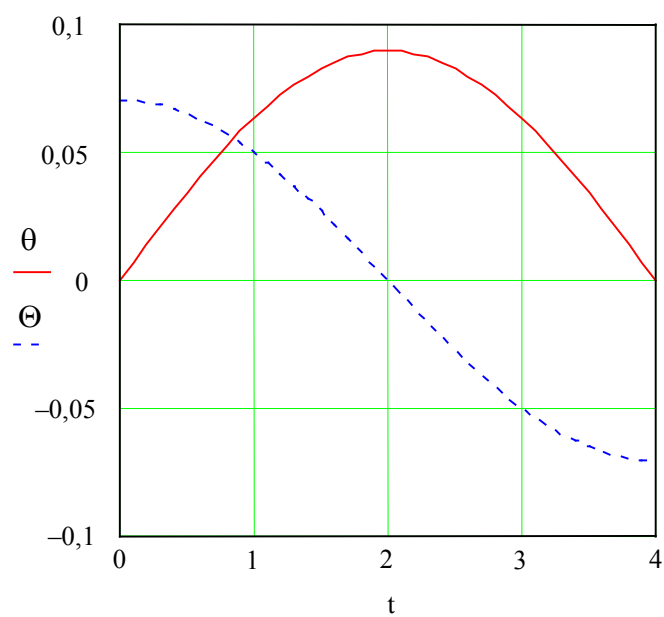
Joonis 1. Pöördel liikuvale traktorile mõjuvad külgsjõud:

a – tsentrifugaaljõust tingitud külgsjõud, b – liikumiskiiruse muutumisest tingitud külgsjõud

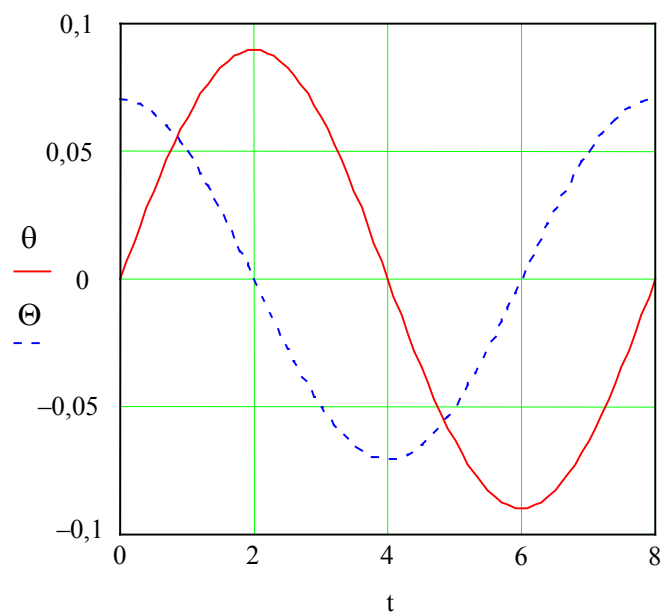
Figure 1. Lateral force affecting the tractor driving on the turning:

a – lateral force caused by the centrifugal force, b – lateral force caused by the variation of the speed

F_T – tsentrifugaaljõud / centrifugal force; F_i – inertsijõud / force of inertia; F_{k1} , F_{k2} – külgsjõud / lateral forces; v_A – raskuskeskme kiirus / velocity of the centre of gravity; v – traktori liikumiskiirus / speed of the tractor; l_b – traktori baas / axle base of the tractor; l_A – raskuskeskme pikikoordinaat / lateral coordinate of the centre of gravity; r – traktori pöörderaadius / turning radius of the tractor; r_1 – raskuskeskme pöörderaadius / turning radius of the centre of gravity; θ – juhtrataste pöördenurk / front wheel turning angle.



a)



b)

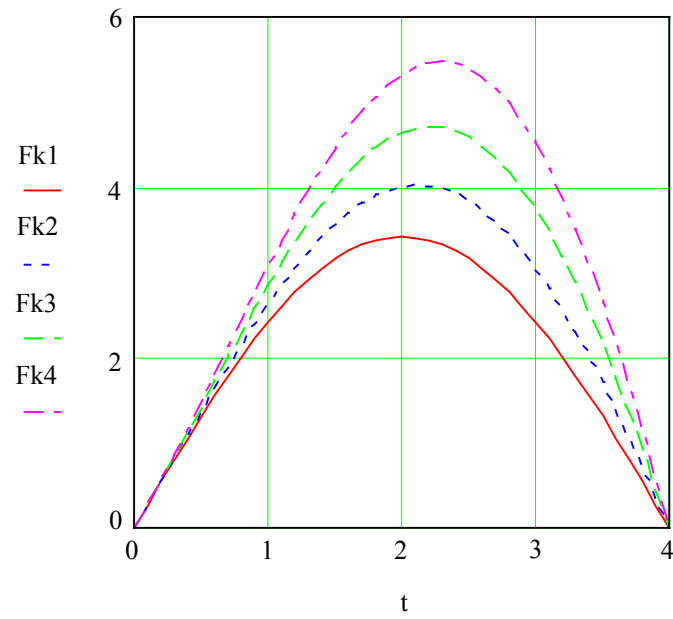
Joonis 2. Juhtrataste pöördenurga muutumine:

a – pöördel, b – sõidurea vahetamisel

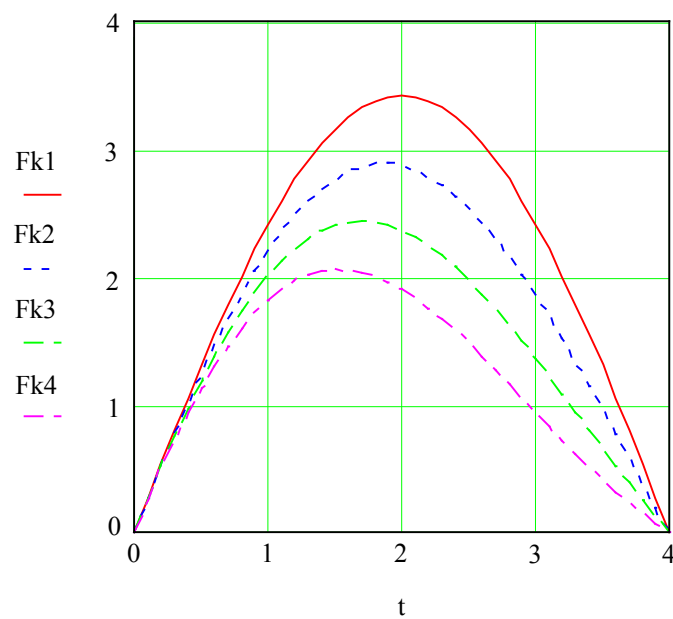
Figure 2. Variation of the front wheel turning angle:

a – on the turning, b – at the changing of the lane

θ – juhtrataste pöördenurk / front wheel turning angle, rad; $\Theta = d\theta/dt$ – juhtrataste pööramise kiirus / front wheel turning speed, s^{-1} ; t – aeg / time, s



a)



b)

Joonis 3. Külgjõu muutumine pöörde läbimisel:

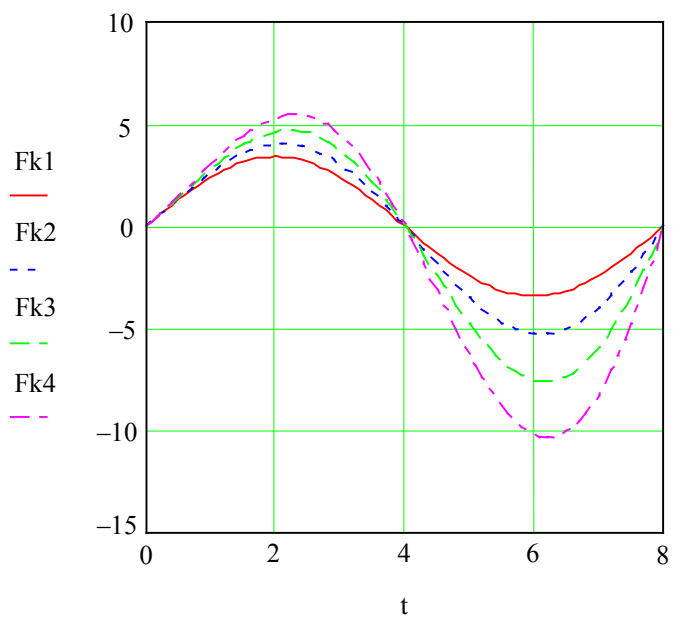
a – kiireneval liikumisel, b – aeglustuval liikumisel

Figure 3. Variation of the lateral force during the turning:

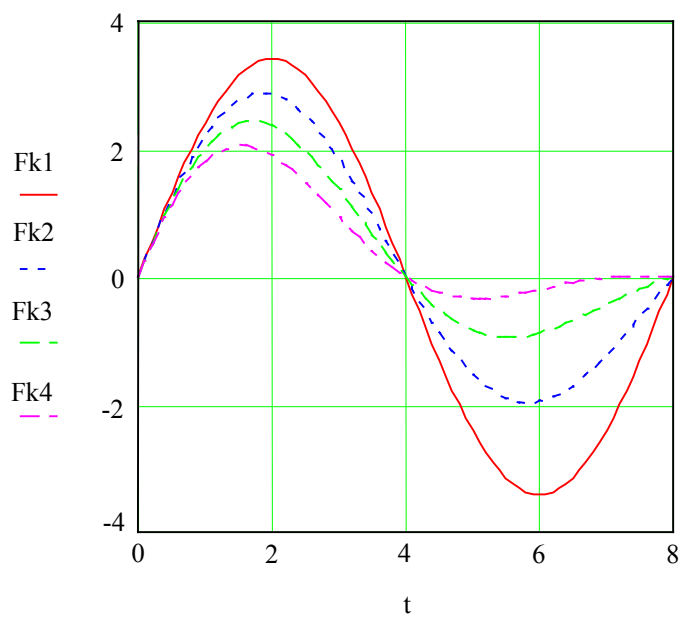
a – at the accelerated motion, b – at the decelerated motion

F_k – külgjõud / lateral force, kN; t – aeg / time, s

1 – $dv/dt = 0 \text{ m/s}^2$; 2 – $dv/dt = \pm 0,2 \text{ m/s}^2$; 3 – $dv/dt = \pm 0,4 \text{ m/s}^2$; 4 – $dv/dt = \pm 0,6 \text{ m/s}^2$



a)



b)

Joonis 4. Külgsõud muutumine sõiduraja vahetamisel:

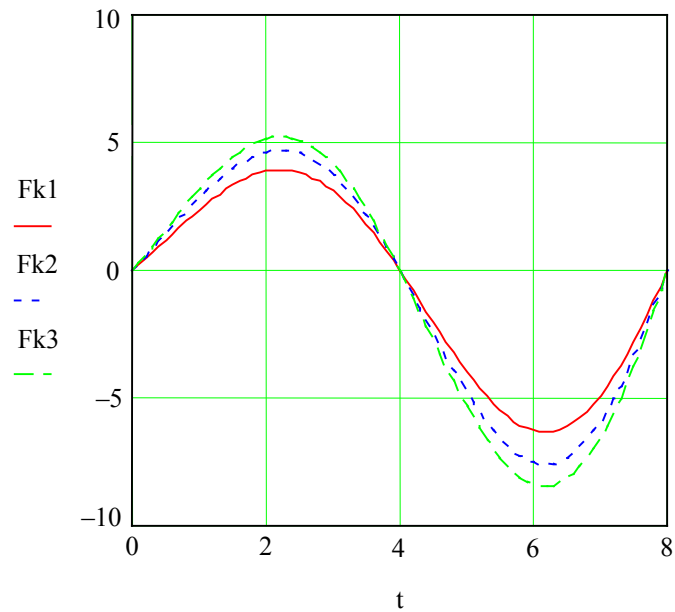
a – kiireneval liikumisel, b – aeglustuval liikumisel

Figure 4. Variation of the lateral force at the changing of the lane:
a – at the accelerated motion, b – at the decelerated motion

F_k – külgsõud / lateral force, kN; t – aeg/time, s

1 – $dv/dt = 0 \text{ m/s}^2$; 2 – $dv/dt = \pm 0,2 \text{ m/s}^2$; 3 – $dv/dt = \pm 0,4 \text{ m/s}^2$;

4 – $dv/dt = \pm 0,6 \text{ m/s}^2$.

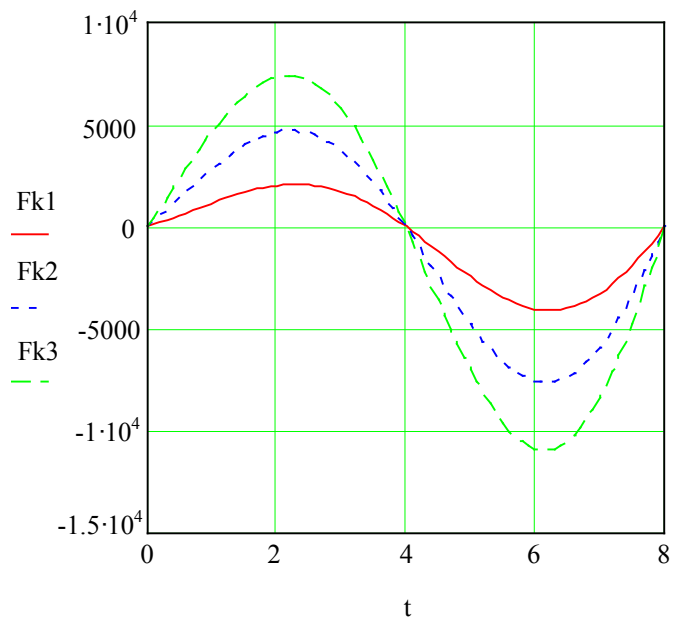


Joonis 5. Traktori massi mõju küljõule (kiireneval liikumisel):

Figure 5. Effect of the mass of the tractor upon the lateral force (at the accelerated motion):

F_k – küljõud / lateral force, kN; t – aeg / time, s

1 – $m = 3000$ kg; 2 – $m = 3600$ kg; 3 – $m = 4000$ kg

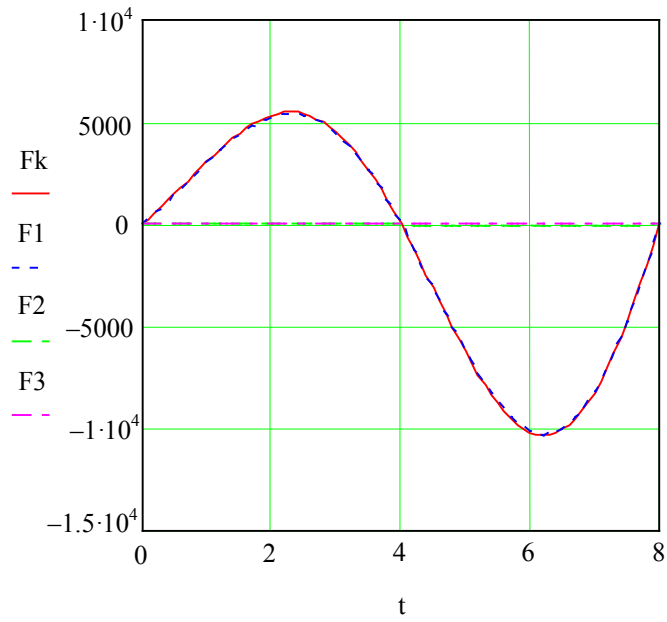


Joonis 6. Traktori liikumiskiiruse mõju küljõule (kiireneval liikumisel):

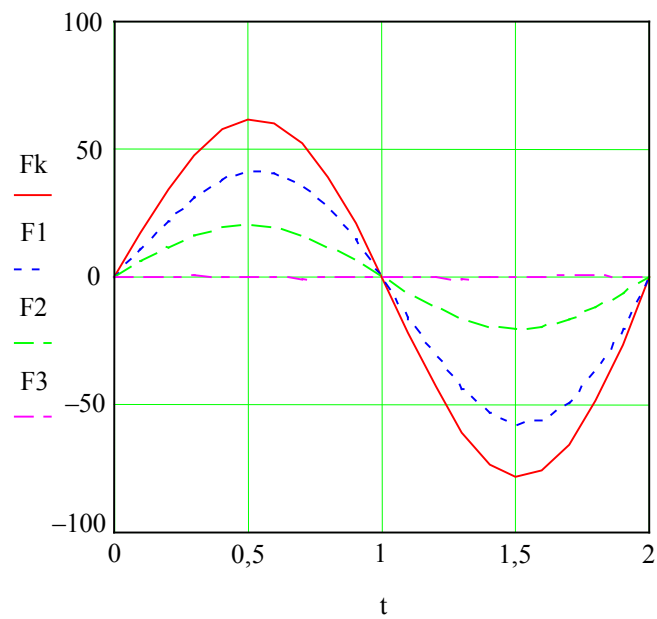
Figure 6. Effect of the speed of tractor upon the lateral force (at the accelerated motion):

F_k – küljõud / lateral force, kN; t – aeg/time, s

1 – $v_0 = 3$ m/s; 2 – $v_0 = 5$ m/s; 3 – $v_0 = 6,5$ m/s



a)



b)

Joonis 7. Külj jõu komponendid:

Figure 7. Components of the lateral force:

F_k – külj jõud / lateral force, N; F_1 , F_2 , F_3 – külj jõu komponendid / components of the lateral force, N; t – aeg / time, s

$a - v_0 = 5$ m/s, $dv/dt = 0,6$ m/s²; $b - v_0 = 0,5$ m/s, $dv/dt = 0,1$ m/s²

Kiireneval liikumisel suureneb külgjõud kiiruse suurenemise tõttu ning liikumise ebapüsivaks muutumise risk suureneb. Kiiruse vähendamine küll vähendab külgjõudu, kuid aeglustus on pööretel rakendatav vaid teatud piirides, olenevalt ratta tugipinnaga haardumise võimest.

Juhtrataste pöördenurgast oleneb traktori liikumistrajektoori raadius ja traktorile mõjuv tsentrifugaaljõud ning liikumiskiiruse kõrval on juhtrataste pöördenurgal väga oluline mõju külgjõule. Üldiselt peab juhtrataste pöördenurk kurvi läbimisel vastama selle raadiusele, kuid olenevalt tee (sõiduraja) laiusel on iga kurvi teatud piirides võimalik läbida mitut erinevat suurema või väiksema raadiusega trajektoori mööda.

Üldiselt võib öelda, et traktori külgjõudu ja püsivust mõjutavad nii traktori tarindus kui agregateerimine töövahenditega, kuid ennekõike tagab traktori (liikurmasina) püsivuse pööretel juhi tegevus.