Mallien parametrisointi

Parametrisoinnin perusperiaatteita

- Simulink mallin blokeihin ei kannata **juuri koskaan** laittaa numeroarvoja
  - Poikkeus: Blokit, jonka arvoa ei varmasti koskaan muuteta
    - Esim. 1: Signaalin kertominen –1:llä (merkin vaihto)
    - Esim. 2: Vertailuissa (esim. x > 0), vertailuarvoa ei tarvitse aina parametrisoida
- Miksi parametreja?
  - Parametrien arvot voidaan hallita keskitetysti yhdessä paikassa parametri m-fileellä
  - Ei tarvitse seikkailla alialialialimalleissa etsimässä haluttua blokia sen arvon muuttamiseksi
  - Parametrin arvon muuttaminen vaikuttaa varmasti kaikissa tarvittavissa blokeissa
    - Esim. sylinterin pinta-ala on mukana monessa paikassa
  - Hyvin nimetyt parametrit helpottavat mallin toiminnan ymmärtämistä

Kuinka parametrisoidaan?

- Hyväksi parametrisointitavaksi on osoittautunut käyttää jokaiselle komponentille omaa **rakenteista muuttujaa**
  - Kukin komponentti näkyy Matlabin työtilassa yhtenä muuttujana
  - Rakenteiseen muuttujaan voidaan tallettaa erilaisia kenttiä, esim. merkkijonoja, vektoreita, matriiseita, skalaareita, toisia rakenteisia muuttujia ...
- Rakenteiset muuttujat määritellään **hyvin kommentoidussa** m-fileessä, jonka nimi on esimerkiksi xxx_params.m, missä xxx on vastaavan simulointimallin nimi
  - Esimerkiksi: malli on harj7.mdl, sitä vastaava parametri m-filee on harj7_params.m
  - Käytännössä lähes joka rivi on kommentoitava
- **Käytä vain ja ainoastaan SI-yksiköitä!** (m, s, N, Pa, m^3/s, ...)

Mitä ja minkä nimisiä kenttiä?

- Jokaiselle rakenteiselle muuttujalle luodaan ainakin yksi ”description” kenttä (merkkijono), joka sisältää avaintietoa komponentista
  - Esimerkki: Valve.description = ’Bosch Regel, NS6, 40 l/min’;
- Tilavuudelle käytetään soveltuvin osin seuraavia kenttiä
  - Vol_xxx.B Puristuskerroin (jos on vakio)
  - Vol_xxx.V Tilavuuden koko (jos on vakio)
  - Vol_xxx.p_ini Paineen alkuarvo
- Kuristukselle käytetään soveltuvin osin seuraavia kenttiä
  - Orif_xxx.QN Nominaali tilavuusvirta
  - Orif_xxx.dpN Nominaali paine-ero
  - Orif_xxx.ptr Siirtymäpaine laminaarisesta turbulenttiseen

Mitä ja minkä nimisiä kenttiä? (jatk.)

- Venttiilille käytetään soveltuvin osin seuraavia kenttiä
  - Valve_xxx.QN, Valve_xxx.dpN ja Valve_xxx.ptr kuten kuristukselle
  - Valve_xxx.delay Viive
  - Valve_xxx.tau Aikavakio
  - Valve_xxx.rate Sulkuelimen avautumis/sulkeutumisnopeus
  - Valve_xxx.w Venttiilin ominaistaajuus
  - Valve_xxx.d Venttiilin vaimennuskerroin
  - Valve_xxx.hysteresis Hystereesi
  - Valve_xxx.Openings.PA_x Näillä voi määritellä venttiilin virtaus-
  - Valve_xxx.Openings.PA_y reunan P-A avauksen luistin aseman funktiona look-up table lohkolla

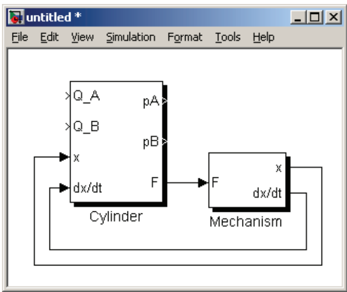
Mitä ja minkä nimisiä kenttiä? (jatk.)

- Sylinterille käytetään soveltuvin osin seuraavia kenttiä
  - Cyl.A_A ja Cyl.A_B Pinta-alat
  - Cyl.stroke Iskunpituus
  - Cyl.V0A ja Cyl.V0B Kuolleet tilavuudet
  - Cyl.B Puristuskerroin (jos vakio)
  - Cyl.FS, Cyl.FC, Cyl.b, Cyl.vs Kitkakäyrän parametrit
  - Cyl.sigma0, Cyl.sigma1 Dyn. kitkamallin parametrit
  - Cyl.K_end Päädyn jousivakio

Mekanismit

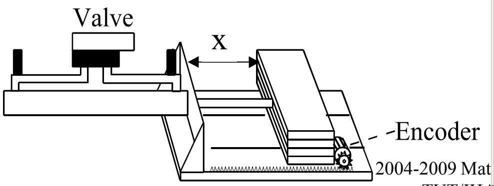
Sylinterin ja mekanismin vuorovaikutukset

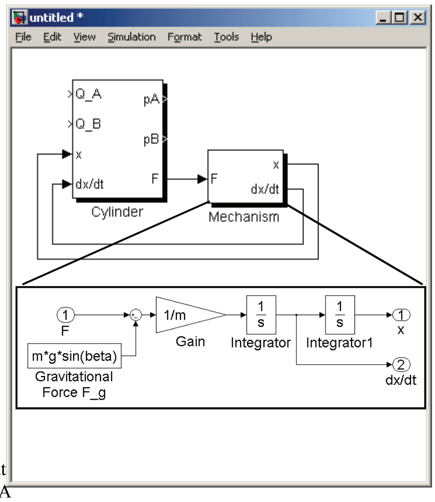
- Sylinteri generoi voimaa
- Voima aiheuttaa sylinteriin kytketyn mekanismin liikkeen ($F = m*a \Leftrightarrow a = F/m$)
- Mekanismin liiketila määrää sylinterin männän aseman ja nopeuden



Esimerkki 1: Sylinteri + kuormamassa

- Puhtaalle massalle pätee $\Sigma F = ma$
- Oletus: massa kiinnitetty jäykästi männän varteen
- Männän asema = massan asema-offset
- Männän nopeus = massan nopeus





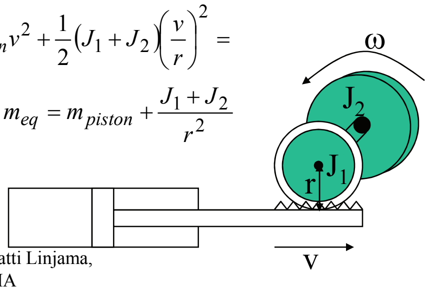
Hitauskuorman redusointi

- Jos järjestelmän välityssuhde on vakio, niin hitauskuorma voidaan usein redusoida sylinterille/moottorille
  - Tulee kyseeseen useimmiten pyörivän liikkeen kanssa
- Esimerkiksi hammastanko-hammasratas välitys
  - Liike-energia

$$T = \frac{1}{2} m_{piston} v^2 + \frac{1}{2}(J_1 + J_2)\omega^2 = \frac{1}{2} m_{piston} v^2 + \frac{1}{2}(J_1 + J_2)\left(\frac{v}{r}\right)^2 =$$

$$\frac{1}{2}\left(m_{piston} + \frac{J_1 + J_2}{r^2}\right)v^2 = \frac{1}{2} m_{eq} v^2 \quad \Rightarrow \quad m_{eq} = m_{piston} + \frac{J_1 + J_2}{r^2}$$

Massa redusoituu verrannollisena välityssuhteen toiseen potenssiin!



Yleinen mekanismimalli

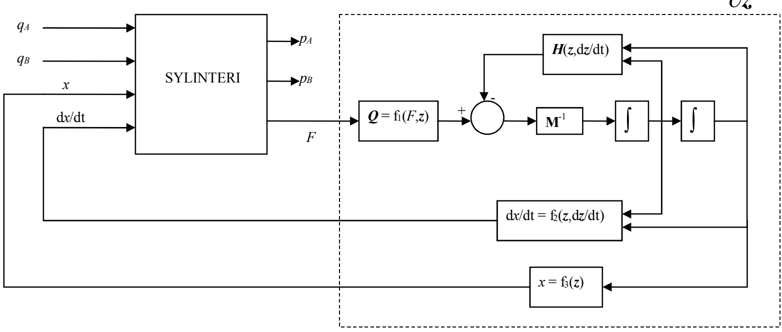
- Kaikki mekanismit voidaan esittää seuraavassa muodossa

$$\mathbf{Q} = \mathbf{M}\ddot{z} + \mathbf{H}(z, \dot{z})$$

  - z = n×1 tilavektori (nivelkulmat, joustoa kuvaavat tilat jne)
  - $\mathbf{M}$ = n×n inertiamatriisi
  - $\mathbf{H}$ = n×1 vektori, joka sisältää mm. gravitaatio-, kitka-, Coriolis- ja keskipakovoimat
  - $\mathbf{Q}$ = n×1 yleistettyjen voimien vektori (mm. nivelmomentit)

Yleinen mekanismimalli

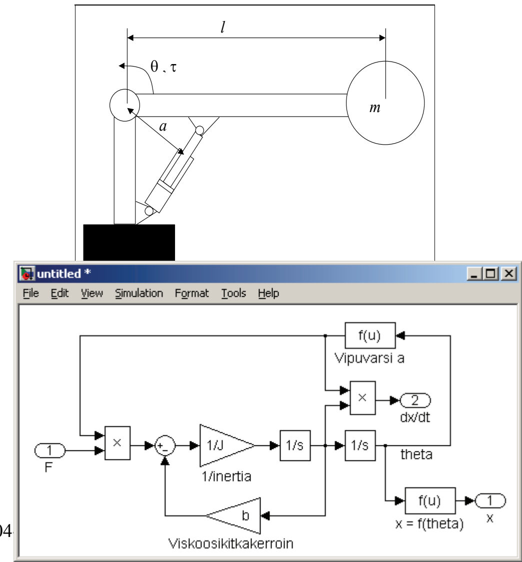
- Ratkaisemalla $\ddot{z}$ saadaan yleispätevä sylinteri-mekanismi lohkokaavio
- Voidaan osoittaa, että $\dot{x} = \mathbf{A}(z)\dot{z}$ ja $\boldsymbol{Q} = \mathbf{A}(z)^{\mathrm{T}} F$, missä $\mathbf{A} = \frac{\partial x}{\partial z}$



MEKANISMI

Esimerkki 2: Hydraulinen nosturi

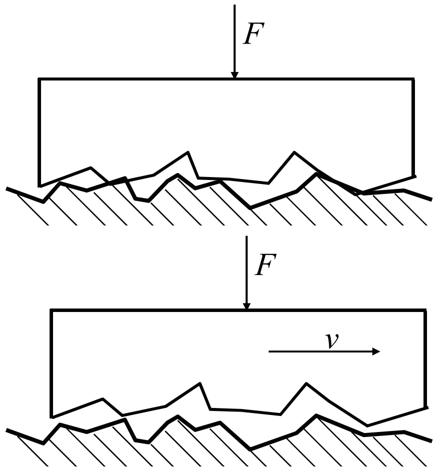
- Varren hitaus:
  - $J = (1/3\ m_{varsi} + m)\ l^2$
- Tehollinen vipuvarsi:
  - $a = f(\theta)$
- Varren momentti:
  - $\tau = a\ F$
- Sylinterin nopeus:
  - $dx/dt = a\ d\theta/dt$
- Männän asema:
  - $x = f(\theta)$
- Liikeyhtälö:
  - $\Sigma\tau = J\ d^2\theta/dt^2$



Sylinterin tiivistekitkan mallinnus

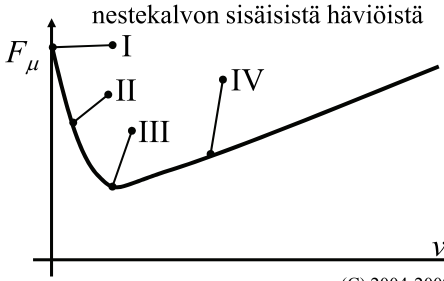
Kitkan syntymekanismi kuivassa liukuparissa

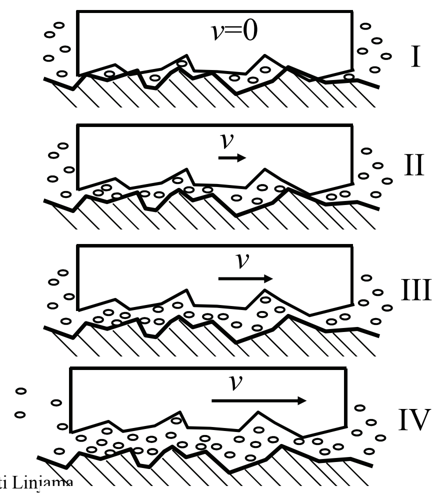
- Pinnan epätasaisuudet
  - Tasaista pintaa ei ole olemassa
- Molekyylien väliset voimat
- Lepokitka:
  - Pinnat ovat painautuneet mahdollisimman tarkkaan toistensa lomaan
- Liikekitka:
  - Pinnat koskettavat toisiaan sieltä täältä, liike pitää pinnat pääosin irti toisistaan
  - Lähes riippumaton liikenopeudesta



Kitka voidelluissa liukupareissa

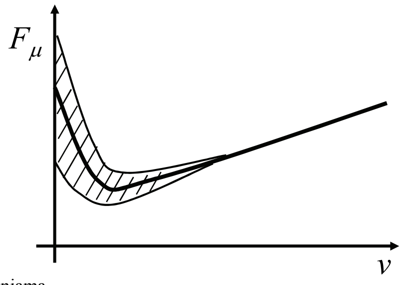
- Lepokitka kuten edellä
- Nopeuden kasvaessa liukupintojen väliin muodostuu nestekalvo, joka erottaa liukupinnat toisistaan
- Suurilla nopeuksilla kitka tulee nestekalvon sisäisistä häviöistä





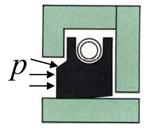
Kitkan ominaispiirteitä

- Aikariippuvuus
  - Lepokitka ei saavuta maksimiarvoaan heti pysäytyksen jälkeen
- Kitkavoima on täsmälleen ulkoisen voiman suuruinen, jos v=0 ja voima pienempi kuin lepokitka
- Stick-slip ilmiö
- Satunnaisuus
- Siis: Suuri epävarmuus



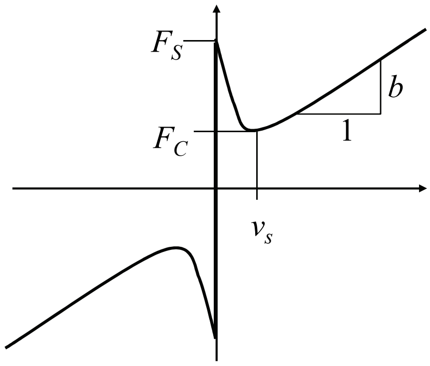
Sylinterin kitkan ominaispiirteitä

- Paine vaikuttaa kitkavoimaan merkittävästi
  - Paine painaa tiivisteitä lujemmin vastinpintaa vasten
  - Iso paine = iso kitka
  - Männän varren puoleinen kammiopaine vaikuttaa enemmän (männän ja männänvarren tiivisteet)
- Tiiviste taipuu ennen liukumista
- Valmistajat eivät ilmoita kitkasta juuri mitään, korkeintaan jonkin tyypillisen mekaanishydraulisen hyötysuhteen
- Siis: Aika peijooni mallinnettava



Kitkavoiman riippuvuus nopeudesta

- Neljä parametria:
  - Lepokitka F_S
  - Coulombin kitka F_C
  - Viskoosikitkakerroin b
  - Minimikitkan nopeus v_S
- Yleensä oletetaan samat arvot molempiin suuntiin



Nopeusriippuvuuden approksimointi

$$F_\mu(\dot{x}, p_A, p_B) = \Psi(p_A, p_B) \times \operatorname{sgn}(\dot{x}) \times \left(F_C + (F_S - F_C) e^{-(\dot{x}/v_S)^2} \right) + b\dot{x}$$

Paineriippuvuus
(jätetään usein pois)

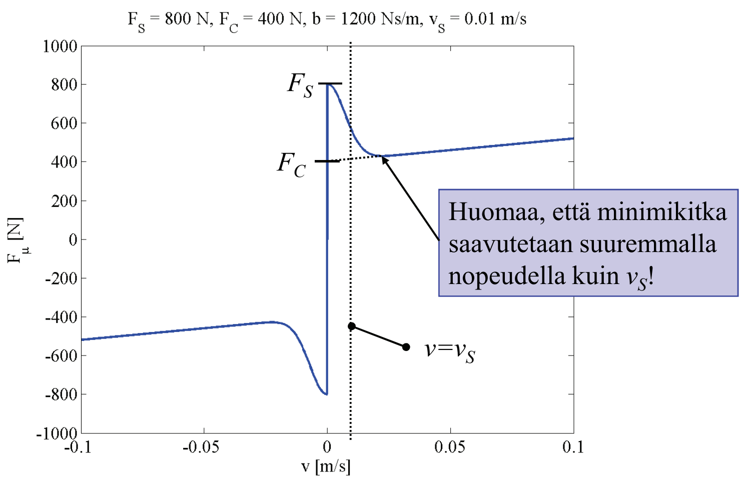
Coulombin kitka

Peilaus negatiivisille nopeuksille

viskoosikitka

Lepokitkatermi, joka häviää nopeuden kasvaessa

Esimerkki



Parametrien määritys

- Valmistajat eivät tietenkään ilmoita mitään
- Nyrkkisääntöjä
  - F_S = 5-15 % sylinterin maksimivoimasta kun paineet ovat maksimissaan
  - F_C on 20-50 % pienempi kuin F_S
  - Viskoosikitkakerroin on samaa luokkaa kuin F_S
  - Minimikitka saavutetaan usein nopeudella 3-15 mm/s
  - Kitkavoima on 30-70 % pienempi pienillä paineilla
- Paineriippuvuuden määritys
  - Usein voidaan olettaa, että Ψ=1
  - Hieman parempaan voi päästä kaavalla $\Psi(p_A, p_B) = 1 + \left(\frac{p_A}{3} + \frac{2p_B}{3}\right) / p_{ref}$ missä p_{ref} määrittelee paineen, jolla kitkavoima on kaksinkertainen nollapaineeseen nähden
- Tarvitaan verifiointimittauksia!

Kitkan simulointi

- Jos edellinen nopeus-kitkakäyrä vähennetään sylinterin generoimasta mallista, niin simulaattori **ei toimi nollanopeudella!**
  - Epäjatkuvuus nollanopeudella
  - Kitkavoima on joko $+F_S$ tai $-F_S$ nollanopeudella
  - Kitkavoima ”tönii” sylinteriä nollanopeuden molemmin puolin, tilanne ei ole simuloitavissa
- Miten kitka toimii oikeasti nollanopeudella?
  - Säätää itsensä automaattisesti sellaiseen arvoon, että kitkavoima on **täsmälleen** sama kuin ulkoinen voima, jolloin mäntä pysyy paikallaan
    - Pintojen ”huippujen” mikrotaipumat
  - Sallii liikkeen, jos lepokitkan arvo ylitetään

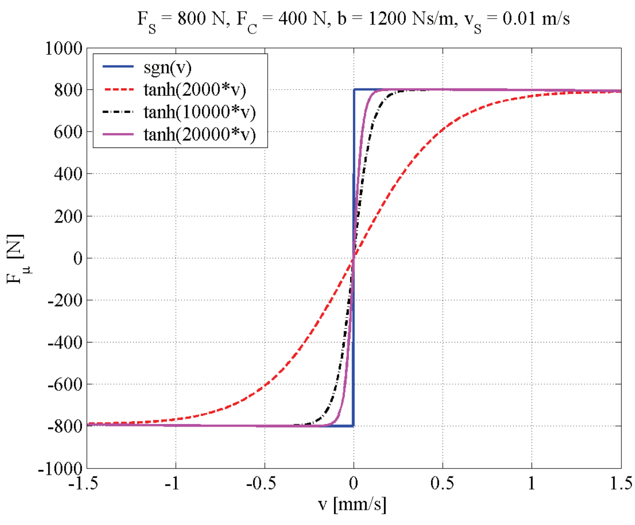
Mallinnustapa I

- Pehmennetään kitkavoiman muutosta nollanopeudella
  - Korvataan sgn-funktio hyperbolisella tangentilla

$$F_\mu\left(\dot{x}, p_A, p_B\right) = \tanh\left(K\dot{x}\right) \times \left(F_C + (F_S - F_C)e^{-(\dot{x}/v_S)^2}\right) + b\dot{x}$$

  - Yksi uusi parametri K, joka määrää kuinka nopeasti kitkavoima muuttuu nollan ympäristössä
    - Sopiva arvo luokkaa 2000-20000

Mallinnustapa I (jatk.)



Mallinnustapa I (jatk.)

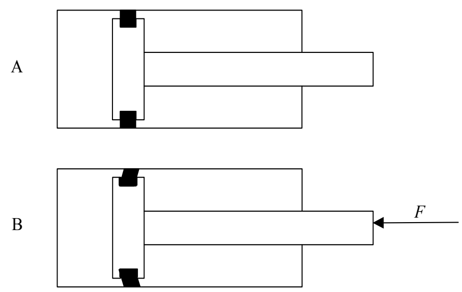
- Mitä tapahtuu pienillä nopeuksilla tanh-approksimaation ansiosta?
  - Nopeus asettuu sellaiseen **nollasta poikkeavaan** arvoon, että kitkavoima ja ulkoinen voima ovat tasapainossa
  - Toimilaite siis **ryömii** vaikka kitkavoiman pitäisi pitää se paikoillaan
    - Ryömimisnopeus sitä pienempi, mitä suurempi *K*
    - Toisaalta suuri *K* vaikeuttaa simulointia

Mallinnustapa I (jatk)

- Hyvät puolet
  - Yksinkertainen
  - Helppo ymmärtää (?)
  - Numeerisesti tehokas
- Huonot puolet
  - Toimilaite ryömii
    - Ei haittaa jos ryömimisnopeus on pieni verrattuna tarkastelujaksoon

Mallinnustapa II: Dynaaminen kitkamalli

- Mitä tapahtuu, jos lepotilassa olevaa mäntää painetaan voimalla $F<F_S$?
  - Mäntä liikkuu hieman tiivisteensä varassa
  - Tiiviste ei ala liukumaan
  - Tiiviste toimii kuten jousi
- Entä jos $F>F_S$?
  - Tiiviste liukuu **taipuneena**
- Entä kun voima poistetaan?
  - Liike pysähtyy
  - Tiiviste oikenee, joten mäntä palaa hieman takaisinpäin



Dynaamisen kitkamallin periaate

- Otetaan sylinterin tiivisteen taipuma uudeksi tilamuuttujaksi
- Kitkavoima määräytyy tiivisteen taipuman perusteella

$$\dot{z} = \dot{x} - \frac{\sigma_0 |\dot{x}|}{F_\mu^*(\dot{x}, p_A, p_B)} z$$

Tiivisteen taipuman *z* tilayhtälö

Kitkavoima positiivisena ja ilman viskoosikitkaa

$$F_\mu = \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + b\dot{x}$$

Tiivisteen vaimennuskerroin

Tiivisteen jousivakio

Dynaaminen kitkamalli

- Taipuman tilayhtälöä ei tarvitse ymmärtää sen tarkemmin
- Malli on kehitetty alunperin tavallisten liukuparien mallinnukseen
  - Alkuperäinen lähde: Canudas de Wit, C., Olsson, H., Åström, K.J. & Lischinsky. P. 1995. **A New Model for Control of Systems with Friction**. IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 40, No. 3, pp. 419-425.
- Malli kuvaa oikein koko joukon vaikeita ilmiöitä
  - Lepokitka pitää männän paikoillaan tiivisteen jouston rajoissa
  - Stick-Slip ilmiö
  - Hysteesi
  - Lepokitka ei kehity nopeissa nollanopeuden ylityksissä

Dynaamisen kitkamallin parametrit

- Kaksi uutta parametria, σ_0 ja σ_1
- σ_0 on tiivisteen jousivakio
  - Voidaan arvioida arvaamalla tiivisteen maksimitaipuma $z_{\max}$, jonka voisi kuvitella olevan luokkaa 0.1-0.5 mm
  - Jousivakio saadaan kaavalla $\sigma_0=F_S/z_{\max}$
- σ_1 kuvastaa tiivisteen vaimennusta
  - Vaikea tietää edes hehtaarilleen oikein
  - Voidaan sovittaa mittausten perusteella
  - Mikrovärähtelyitä tiivisteen varassa ei esiinny, jos σ_1 on luokkaa $0.5...2\times(\sigma_0\, m)^{0.5}$, missä m on sylinterin tehollinen hitauskuorma
    - Tätä arvoa kannattaa käyttää, jos ei muuta tiedetä

Dynaamisen kitkamallin edut ja haitat

- Edut:
  - Lepokitka pitää sylinterin paikallaan
  - Vain kaksi parametria
  - Kohtuullisen yksinkertainen
  - Hyvin perusteltu sylinterikäytössä tiivisteen jouston vuoksi
- Haitat:
  - Parametri σ_1 on vaikea määrittää
  - Yksi uusi tilamuuttuja, simulointi hidastuu

Kitkamallin lisääminen sylinteriin

- Käytettiinpä kumpaa mallinnustapaa tahansa, niin tuloksena on yleispätevä malli, jonka inputtina on männän nopeus ja outputtina kitkavoima
- Tämän mallin lisääminen sylinteri-malliin on triviaalia