Logo LUT University

Description automatically generated

**1-D Hydraulic slider simulation**

BK60A1001 Control of mechatronic machines

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

Master’s degree in mechanical engineering

2023

Joni Leskelä 000481137

Examiner: Marjan Alizadeh

**Table of contents**

[1. Introduction 10](#_Toc135537100)

[2. Mathematical model 11](#_Toc135537101)

[2.1 Motion equations 11](#_Toc135537102)

[2.2 Valve equations 12](#_Toc135537103)

[2.2.1 Valve flow equations 12](#_Toc135537104)

[2.2.2 Valve leakage equations 13](#_Toc135537105)

[2.2.3 Valve pressure equations 13](#_Toc135537106)

[2.3 Hydraulic cylinder chamber volumes 14](#_Toc135537107)

[3. System modelling 15](#_Toc135537108)

[4. Closed loop systems and PID tuning 29](#_Toc135537109)

[5. Results 33](#_Toc135537110)

[6. Conclusion and discussion 34](#_Toc135537111)

Appendices

Appendix 1. System overview and subsystems

1. Introduction

This report consists of simulation work done for hydraulic 1-D slider with PID control. Goal of the project has been to build a mathematical model of the system by using Matlab/Simulink. Simulation should provide results that can be replicated with a real physical system. Another goal for the project is to learn and apply knowledge of control systems to simulation of physical systems.

The modelled system consists of a hydraulic cylinder that is actuated by a servo valve. Servo valve has a nominal flow rate of 40,2 L/min and is equipped with linear variable differential transducer. Valve electronics are all embedded into valve. Valve’s input signal range is from -10V to +10V. Hydraulic cylinder is asymmetric double acting cylinder with a max stroke of 1 meter. The hydraulic cylinder actuates a mass of 210kg that’s situated on a slider. Hydraulic pump has a nominal pressure of 25 MPa and the working pressure is 14 MPa. Tank pressure is 0,3 MPa. System has 4 pressure sensors that are used to measure tank pressure, supply pressure and pressure in hydraulic cylinder extension and retraction lines. Displacement sensor is used to provide information about cylinder position.

Data acquisition is done with dSPACE digital signal processor. Input voltage for the valve is fed through DS1103 I/O card. Sampling frequency of the signal processor is 1000 Hz. Hardware of the system is connected to electrical convertor and amplifiers so that that they can be fed to data processing and analysis.

Physical constant values are given to use in formulas which are used to describe the inner workings of the system.

2. Mathematical model

Mathematical modelling is the basis for the simulation. The physical system should be described by mathematical equations that represent actual real-world phenomena. To get accurate result from the simulation small phenomena shouldn’t be ignored and needs to be accommodated into mathematical model. In this project hydraulic valve is assumed to have leakage which needs to be calculated and its effect into system must be modelled. Additionally, friction force of the hydraulic cylinder is modelled using LuGre model. Reason being that static friction models can’t explain real world phenomenon such as stick slip motion, pre-sliding displacement and friction lag. If such phenomena aren’t considered accurate PID control can’t be implemented in a way that can be replicated in real system.

2.1 Motion equations

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, viiva, kuvakaappaus, Suunnitelma

Kuvaus luotu automaattisesti

Figure 1. Overview of system to be modelled.

Equation of the motion can be expressed with equation:

*(1)*

Where m is the actuated mass, p1 and p2 pressures acting on each side of hydraulic cylinder and A1, A2 respectively the area upon which pressure is acting on each side. Ff is the friction force calculated by the LuGre friction model. Friction force is calculated by following 3 equations.

*(2)*

*(3)*

*(4)*

Values for constants in equations can be found in system constants list.

2.2 Valve equations

Valve is the most complex part of the system that affects everything in the system. As such it is critical that valve is modelled mathematically correctly. Spool movement inside the valve is the most important part of the simulation and hence it needs to be accurate and correct. Spool dynamics can be represented by following formula:

*(5)*

Where u is the input voltage to spool and us is the actual voltage given by linear variable differential transducer. Constants for the equation are available in system constants list.

2.2.1 Valve flow equations

Valve flows can be calculated with following equations:

*(6)*

*(7)*

Valve has two output ports to hydraulic cylinder. Depending on the spool position the equation for calculating the flow is different. Hence there is two equations for both flows. Sign function is used to smooth the flow when changing the flow direction from port A to port B or vice versa.

2.2.2 Valve leakage equations

Leakage in valves is divided in to two separate leakages. The first being internal leakage of the valve and the second external leakage of the valve. Internal leakage of the valve can be calculated with following equation.

*(8)*

External leakage is calculated with following two equations.

*(9)*

*(10)*

Difference between these two leakage types is that internal leakage is the leakage that happens inside the hydraulic system when flow passes through unintended flow passage. Such as small circular gap between valve spool and spool housing. External leakage refers to leakage to outside the system. It is usually caused by loose fitting and damaged seals, but leakage is also an inherent feature of hydraulic systems. Leakage coefficients are available in system constant list.

2.2.3 Valve pressure equations

Pressure equations use calculated flows, piston movement and leakages to calculate the pressure in system.

*(11)*

*(12)*

Bulk modulus for pressure equations needs to be calculated with equation:

*(13)*

Coefficients a1-a3 are available in system constant list. Subscript i indicates values in either port. Pressure equation needs also volume that has a relation to hydraulic cylinder.

2.3 Hydraulic cylinder chamber volumes

Chamber volumes for pressure equations can be solved from following equations.

*(14)*

*(15)*

Where L is the maximum stroke of the cylinder, xp the current position of the cylinder. A1 and A2 respective piston side and rod side areas. Volumes v01 and v02 are the volumes of hydraulic piping/hoses between the valve and hydraulic cylinder.

3. System modelling

System was modelled with Matlab/Simulink. To begin with system constants were defined in .m file script. The advantage of using .m file with system constants rather than using constants in Simulink is the ease of updating simulation model. Constant value can be easily updated in .m file script and updating of the new values to simulation requires only running the script to update values. If done by constants in Simulink each instance of changed constant would need to be manually changed to a new value.

Kuva, joka sisältää kohteen teksti, kuvakaappaus, numero

Kuvaus luotu automaattisesti

Figure 2. System constants in .m file

To build the model in Simulink we must first build the equations that describe the physical system. Starting with the motion of the system by modelling equation 1.

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, teksti, Suunnitelma, Suorakaide

Kuvaus luotu automaattisesti

Figure 3. Motion of the system in Simulink.

Motion subsystem has two inputs and two outputs. Inputs are pressures p1 and p2 and outputs of the subsystem are piston velocity and piston position. Friction component of the subsystem consists of equations 2, 3 and 4. Equation 4 is made into own subsystem. Z has a value of 0.001 in equations.

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, Suunnitelma, Tekninen piirros, piirros

Kuvaus luotu automaattisesti

Figure 4. Inside of equation 4 subsystem.

Xpdot and xpd are both piston velocity.

Kuva, joka sisältää kohteen teksti, diagrammi, kuvakaappaus, Suorakaide

Kuvaus luotu automaattisesti

Figure 5. Structure of whole motion subsystem with inputs and outputs.

Following the motion subsystem, we can progress to modelling of valve dynamics. Valve dynamics have one input and one output. Input is voltage to valve and output is the actual voltage. Subsystem consists of 3 subsystems in which calculation are performed. Names of the subsystem describe the formula calculated inside.

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, Tekninen piirros, Suunnitelma, viiva

Kuvaus luotu automaattisesti

Figure 6. Valve dynamics subsystem

Dynamics subsystem matches equation 5.

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, Tekninen piirros, Suunnitelma, luonnos

Kuvaus luotu automaattisesti

Figure 7. Subsystems of valve dynamics

In top is the subsystem of omegan2. Left subsystem is Kwn2 and right subsystem is 2zeetaomegan.

Continuing with valve equations and building the model for flows. As output of the valve dynamics, Us, is used to control spool position and in equations, the model becomes more complex. Also, there is two equations for calculating the volume flow and correct choice depends on the value of Us. So, a logic that selects the correct formula needs to be implemented.

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, Suunnitelma, Tekninen piirros, piirros

Kuvaus luotu automaattisesti

Figure 8. Full picture of volume flow calculations.

Picture shows calculations for equation 6 and 7. At the end is selector logic which uses the value of Us to choose the correct formula.

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, muotoilu

Kuvaus luotu automaattisesti

Figure 9. Calculation performed in top left subsystem.

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, Suunnitelma, viiva, Tekninen piirros

Kuvaus luotu automaattisesti

Figure 10. Calculation performed in the four subsystems for flows.

As there are two equations for volume flow in each port there is four subsystems. UsCs part of the equation is calculated as shown in figure 9. The four subsystems calculate the signum function value and square root value which are then multiplied with the value of UsCs. All four subsystems are similar, only the sum block has difference to calculate the pressure difference according to equations 6 and 7.

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, Tekninen piirros, Suunnitelma, piirros

Kuvaus luotu automaattisesti

Figure 11. Selector logic for choosing the correct volume flow equation.

Logic works by comparing the value of input, Us, in this case whether the value of Us is greater than zero or not. If it is, then “if” portion of the code gets performed. In other cases, “else” part of the code.

To calculate volume flows we needs to know pressures p1 and p2. To build the pressure equations 11 and 12 we need to calculate quite a few things.

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, teksti, Suorakaide, luonnos

Kuvaus luotu automaattisesti

Figure 12. Subsystems for pressure 1 and pressure 2.

As we can see from the inputs to pressure equations, we don’t currently have all needed information to calculate the pressure. At this point we have only built a model that can calculate volume flows Q1 and Q2. Everything else needs to be implemented into model.

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, Tekninen piirros, Suunnitelma, viiva

Kuvaus luotu automaattisesti

Figure 13. Pressure equation 1 subsystem opened.

Figure 13 shows the calculation performed in pressure subsystem. Both pressure 1 and pressure 2 subsystems are the same in accordance with their respective inputs. Pressure 2 summation block differs by the sign of inputs.

Starting from the top second input. A1xp’ means piston side area times the piston velocity. For pressure two calculation is the same but rod side area is used in place of piston area.

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, teksti, Suorakaide, kuvakaappaus

Kuvaus luotu automaattisesti

Figure 14. Calculating second input to pressure equation.

As can be seen from figure 14 piston velocity is solved from motion equation shown in figures 3, 4 and 5. As the piston velocity is same on both piston and rod side, same piston velocity can also be used for solving A2xp’ input in pressure two.

Pressure equations also need the inner and external leakage of the valve to calculate the pressure. Inner leakage of the valve is modelled according to equation 8.

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, muotoilu

Kuvaus luotu automaattisesti

Figure 15. Inner leakage of the valve in subsystem.

Inner leakage of the valve is calculated the same way for both pressure one and two, only sign of the leakage is different between them.

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, luonnos, Suunnitelma, muotoilu

Kuvaus luotu automaattisesti

Figure 16. External leakage subsystem

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, luonnos, Suunnitelma, muotoilu

Kuvaus luotu automaattisesti

Figure 17. Second subsystem for external leakage.

External leakage is calculated according to equations 9 and 10. Leakage coefficients are available in the system parameters.

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, Suunnitelma, Tekninen piirros, piirros

Kuvaus luotu automaattisesti

Figure 18. Subsystem for calculating the effective bulk modulus.

Effective bulk modulus is calculated with equation 13. Only difference between βe1 and βe2 is the input pressure.

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, Tekninen piirros, Suunnitelma, Fontti

Kuvaus luotu automaattisesti

Figure 19. Subsystem for calculating volume 1

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, Tekninen piirros, Suunnitelma, luonnos

Kuvaus luotu automaattisesti

Figure 20. Subsystem for calculating volume 2.

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, Suunnitelma, teksti, Tekninen piirros

Kuvaus luotu automaattisesti

Figure 21. Connecting blocks into pressure subsystem

As can be seen from figure 21 simulation model has become quite complex.

4. Closed loop systems and PID tuning

Closed loop systems use PID controller to control the output of the system. It’s done by using feedback system where output of the system is used as input to system. In chapter 3 we have created plant model for the system. For the PID tuning we must add PID controller to simulation model and then tune it so that it performs well. Feedback loop is closed by feeding the position of the hydraulic cylinder back.

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, Suunnitelma, Tekninen piirros, piirros

Kuvaus luotu automaattisesti

Figure 22. Overview of the finished system

To start tuning the PID controller the first thing to do is to set integral and derivative to zero and focus only on proportional gain portion of the controller. By increasing the proportional gain, we are decreasing the rise time and hence making the system more responsive.

Kuva, joka sisältää kohteen viiva, teksti, Tontti, kuvakaappaus

Kuvaus luotu automaattisesti

Figure 23. Start for the PID tuning with step input.

As can be seen from the figure 23 step response of the system is slow with proportional gain of 1. Simulation time is 50 seconds and it quite a long time to produce desired response. To provide a better response let’s increase the gain portion of the PID controller.

Kuva, joka sisältää kohteen kuvakaappaus, viiva

Kuvaus luotu automaattisesti

Figure 24. By increasing the gain, we get a faster response.

In figure 24 simulation time could be drastically lowered to 10 seconds since the response of the system is faster. Response also shows good characteristics, so no further tuning needed for step input.

Kuva, joka sisältää kohteen viiva, kuvakaappaus

Kuvaus luotu automaattisesti

Figure 25. Finding the gain value where signal starts to oscillate for sine wave input.

After finding the value where signal starts to oscillate we use Zieger-Nichols tuning rules for PID controller.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Controller | Kp | Ti | Td |
| PID | 0.6Kcr | 0.5Pcr | 0.125Pcr |

Table 1. Zieger-Nichols tuning rule for PID controller.

Where Kcr is the experimentally obtained gain value where system starts to oscillate. Pcr is the period between oscillations, peak to peak.

Kuva, joka sisältää kohteen viiva, Tontti, teksti, kuvakaappaus

Kuvaus luotu automaattisesti

Figure 26. Response with values from table 1.

Kuva, joka sisältää kohteen viiva, kuvakaappaus, Tontti

Kuvaus luotu automaattisesti

Figure 27. Pulse input

Pulse input response is highly dependent on the parameters of the input pulse. In this simulation period is set to be 5 seconds and pulse width 50% of the period.

Kuva, joka sisältää kohteen viiva, kuvakaappaus, teksti, ohjelmisto

Kuvaus luotu automaattisesti

Figure 28. Oscillation

Lastly the response with ramp input.

Kuva, joka sisältää kohteen viiva, teksti, Tontti, kuvakaappaus

Kuvaus luotu automaattisesti

Figure 29. Ramp input.

5. Results

Results of the simulation do not meet the initial expectations for the simulation results. System was built using the equations and constant values provided for the project. Output of the system deviates from the expected output when using different inputs. System also suffers from stability issues when tuning. Some specific values cause simulation to fail.

Reasons for unexpected simulation can be explained by several things. Model complexity could have been the reason for inaccuracies. Simulink models provide inaccurate results if even one part of the simulation is incorrect. One mistake in modelling of the system could have been the reason for inaccurate simulation results.

Controller could also have been designed and tuned wrongly. Also, the parameters for the inputs to controller could have been incorrect.

Numerical issues could have been one of the reasons for inaccuracies. Model used ode4 solver with fixed step size of 1e-3. Step size change can provide wildly different results for the same simulation model.

Unlikely but possible reason for irregular behaviour can be explained by wrong values for parameters. As system should have matched the behaviour of the real physical system the possibility exists.

6. Conclusion and discussion

As a summary in this project a Simulink simulation model was built to simulate the behaviour of 1-D hydraulic slider. Also, a closed loop control system was built for the model. However, the simulation results weren’t according to expectations. Despite the challenges in building the model and unexpected results project has been a great a learning experience about simulation of real-world physical systems.

Appendix 1: System overview and subsystems

Presented below is the overview of the Simulink system and the structure of the subsystems.

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, Suunnitelma, teksti, Tekninen piirros

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen teksti, diagrammi, Suorakaide, kuvakaappaus

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, teksti, Suorakaide, Suunnitelma

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen teksti, diagrammi, Suorakaide, kuvakaappaus

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, Tekninen piirros, luonnos, Suunnitelma

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, luonnos, Suunnitelma, Tekninen piirros

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, Suunnitelma, viiva, Tekninen piirros

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, luonnos, Suunnitelma, muotoilu

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen teksti, diagrammi, kuvakaappaus, viiva

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, Fontti, muotoilu

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, viiva, Suunnitelma, Suorakaide

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, Tekninen piirros, Suunnitelma, muotoilu

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, Suorakaide, viiva, Suunnitelma

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, luonnos, Suunnitelma, Tekninen piirros

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, viiva, Suunnitelma, Tekninen piirros

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, muotoilu

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, Suorakaide, viiva, Suunnitelma

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, luonnos, Suunnitelma, Tekninen piirros

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, viiva, kuvakaappaus, neliö

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, Suunnitelma, Tekninen piirros, piirros

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen teksti, diagrammi, kuvakaappaus, viiva

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, luonnos, Tekninen piirros, Suunnitelma

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen teksti, diagrammi, viiva, kuvakaappaus

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, Tekninen piirros, Suunnitelma, viiva

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen teksti, diagrammi, kuvakaappaus, Fontti

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, Suunnitelma, Tekninen piirros

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen teksti, kuvakaappaus, diagrammi, Fontti

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, Suunnitelma, Tekninen piirros, piirros

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen teksti, diagrammi, Fontti, muotoilu

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, luonnos, Tekninen piirros, Suunnitelma

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen teksti, diagrammi, kuvakaappaus, viiva

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, luonnos, Tekninen piirros, Suunnitelma

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, Fontti, viiva, valkoinen

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, luonnos, muotoilu

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen teksti, diagrammi, valkoinen, kuvakaappaus

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, tunkki, muotoilu

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen teksti, kuvakaappaus, Suorakaide, valkoinen

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, Suunnitelma, Tekninen piirros, piirros

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen teksti, Fontti, diagrammi, Suorakaide

Kuvaus luotu automaattisesti

Kuva, joka sisältää kohteen diagrammi, Suunnitelma, Tekninen piirros, luonnos

Kuvaus luotu automaattisesti