Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 7.52
ДОИ: https://doi.org/10.24867/35IH02Cirkovic

Регулација силе при хватању објеката различитих карактеристика помоћу флексибилне роботске хватаљке

Grip Force Regulation in the Manipulation of Objects with Different Characteristic Using a Soft Robotic Gripper

Момир Ћирковић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – МЕХАТРОНИКА

Кратак садржај – *Рад се бави развојем и управљањем флексибилне пнеуматске хватаљке за рад са објектима различитих карактеристика. Изабрани су сензор силе, програмабилно логички контролер, пнеуматска хватаљка и остале компоненте система, које су приказане кроз електричну и пнеуматску шему. Сензори пружају повратну информацију за пропорционално-интегрално-диференцијални (PID) регулатор притиска, који остварује жељену силу хватања, а тестирањем је потврђена функционалност и применљивост система.*

Кључне речи: *индустријска аутоматизација, флексибилна пнеуматска хватаљка, регулација силе.*

Abstract – *The thesis focuses on the development and control of a soft pneumatic gripper for handling objects with different characteristics. Selected components include force sensors (FSR), a programmable logic controller, the pneumatic gripper itself, and other system elements, which are presented through electric and pneumatic schematics. The sensors provide feedback to the proportional-integral-derivative (PID) pressure regulator, which achieves the desired grip force, and testing confirmed the functionality and applicability of the system in industrial environments.*

Keywords: *industrial automation, soft pneumatic gripper, grip force regulation.*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је била др Драгана Орос, ванр. проф.

1. УВОД

Индустријске машине и роботски системи данас чине основу савремене аутоматизације јер омогућавају да се велики број сложених производних процеса одвија брзо прецизно и поуздано. С обзиром на то да се намена индустријских машина и робота одређује специфичним задатком, пресудну улогу у његовој функционалности има одговарајући крајњи извршни елемент (енг. end-effector). End-effector је један од најважнијих елемената који одређује шта робот или машина заправо може да уради и он представља „алат“ који омогућава физичку интеракцију са околином или објектом од интереса. Код индустријског робота end-effector представља последњи сегмент у кинематском ланцу и веома важан подсистем за успешну примену робота. Он може бити једноставна механичка или флексибилна хватаљка, заваривачка глава, алат за брушење, сензор силе па чак и комплексан мултифункционални систем. Због тога се избор end-effectora сматра једним од најкритичнијих елемената роботике, јер од њихове функционалности зависе брзина, прецизност, флексибилност и безбедност целог производног процеса [1, 2].

End-effectore можемо поделити према њиховој функцији и намени у 5 група [2]:

- Манипулациони end-effector (хватачи),
- Алати,
- Мерни и контролни уређаји,
- Специјализовани end-effector,
- Мултифункционални и модуларни end-effector.

2. „МЕКИ“ END-EFECTOR

„Меки“ (енг. soft) end-effectori се могу сврстати и у манипулациону и у специјализовану групу end-effectora, у зависности од његове конструкције и намене. То су најчешће хватаљке направљене од флексибилних и високо прилагодљивих материјала попут силикона и еластомера. Флексибилне хватаљке се због својих еластичних особина „прилагођавају“ објектима различитих облика и димензија и тако омогућавају да се сила равномерно распореди по контактној површини.

Пнеуматске флексибилне хватаљке се најчешће заснивају на конфигурацији са пнеуматским коморама. Пуњењем ових комора, долази до контролисаног савијања и ширења меких делова хватаљке, што јој омогућава да се природно прилагоди објекту који се хвата. Због мекоће материјала и њихове способности да апсорбују мање неправилности у положају, ове хватаљке добро подносе одступања у позиционирању и не захтевају прецизно позиционирање у односу на објекат. Захваљујући овим карактеристикама, флексибилне хватаљке налазе примену у прехрамбеној индустрији, биомедицинским и лабораторијским процесима, системима за паковање и сортирање, системима где је неопходна сигурна и прилагодљива

интеракција са предметима различитих димензија и механичких својстава. Ови системи одликују се високим степеном флексибилности, добром безбедношћу и брзим временом реакције. Њихова висока прилагодљивост чини их изузетно погодним решењем у апликацијама где класична, чврста хватаљка није довољно поуздана [3].

Флексибилне хватаљке са сензорима силе, које ћемо користити у нашем пројекту, представљају комбиновани (хибридни) end-efector који припада манипулационој групи, али поседује карактеристике мерних и сензорских end-efectora.

3. ЗАДАТАК И ИЗБОР КОМПОНЕНТИ

Овај пројекат служи како би се већ постојећи системи флексибилних пнеуматских хватаљки додатно унапредили и како би имали што већу примену у индустрији. Идеја за унапређење оваквих актуатора довела је до тога да се у развијени систем флексибилних хватаљки додају сензори силе, како би се побољшала управљивост и проширио спектар примене ових хватаљки. Додавање сензора силе на прсте хватаљке није једноставно. Потребно је додати довољно мале (микро) или подједнако флексибилне сензоре који мере силу на самом прсту, а да при томе не утичу на флексибилне карактеристике пнеуматске хватаљке.

Да би остварили жељену силу у флексибилној хватаљци, потребно је да регулишемо притисак ваздуха који делује на унутрашње зидове самог прста хватаљке. Жељена вредност ваздуха под притиском на улазу у сам актуатор може се остварити ако се у пнеуматски систем дода пропорционални регулатор притиска. Пропорционално доведеном напону/струји, на излазу из регулатора добија се жељена вредност притиска. Управљање пропорционалним регулатором је могуће помоћу програмабилно логичког контролера који у себи садржи аналогни излаз са опсегом напона/струје који регулатор захтева. Додавањем флексибилних отпорника осетљивих на промену силе (енг. Force Sensing Resistor - FSR) на прсте хватаљке добијамо информацију о сили којом хватаљка делује на предмет рада. Информација о сили деловања је значајна код PID регулације ваздуха под притиском.

Идеја овог пројекта је унапређење управљачког система пнеуматских флексибилних хватаљки ради повећања њихове флексибилности у индустријским системима.

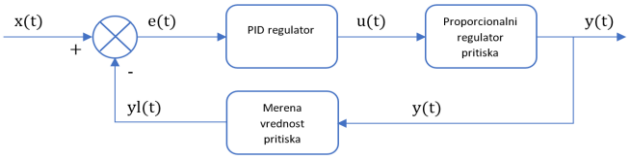
Избор компоненти система се своди на избор:

- Програмабилно логичког контролера
- Флексибилног сензора силе (FSR сензор)
- Пропорционалног регулатора притиска
- Флексибилне пнеуматске хватаљке
- Сензора притиска
- Напајања
- Осигурача
- Осталих пропратних компоненти система

Избором компоненти система прави се функционална шема према управљачкој логици ради аутоматизације управљања.

4. РЕГУЛАЦИЈА ВАЗДУХА ПОД ПРИТИСКОМ И ПОДЕШАВАЊЕ PID ПАРАМЕТАРА

Систем аутоматског управљања (САУ) који се користи у овом пројекту спада под затворени систем аутоматског управљања. Код затвореног типа САУ постоји повратна спрега која враћа информацију о вредности регулисане величине притиска у систему. Мерни уређај у пропорционалном регулатору мери тренутну вредност притиска и затим је враћа у форми електричног сигнала yl(t), који се доводи на дискриминатор. Дискриминатор представља детектор сигнала грешке e(t) и он заправо пореди сигнал стварне (измерене) вредности са сигналом задате (жељене) вредности притиска. Као резултат поређења, на излазу из дискриминатора добијамо њихову разлику (сигнал грешке) која се касније одводи ка PID регулатору. PID регулатор формира нови управљачки сигнал u(t) уз помоћ кога делује на објекат управљања (пропорционални регулатор притиска), на основу сигнала грешке e(t) који је добио. Регулација аутоматског система има за циљ да изједначи вредности жељене x(t) и стварне y(t) величине притиска, као и да доведе до тога да сигнал грешке e(t) буде једнак нули. Блок шема затвореног система аутоматског управљања приказана је на Слици 1.



Слика 1. Блок шема затвореног САУ у временском домену

У овом случају PID регулатор се може описати следећим изразом (1):

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} + K_i \int_{-\infty}^{t} e(t)dt \qquad (1)$$

Применом Лапласових трансформација систем се пребацује у S домен. Експериментима спроведеним на пнеуматским вентилима утврђено је да се однос између протока и притиска на врху вентила за линеарни вентил често може представити преносном функцијом првог реда [4]. Преносна функција првог реда приказана је изразом (2):

$$G_0(s) = \frac{K_0}{T_0 s + 1} \qquad (2)$$

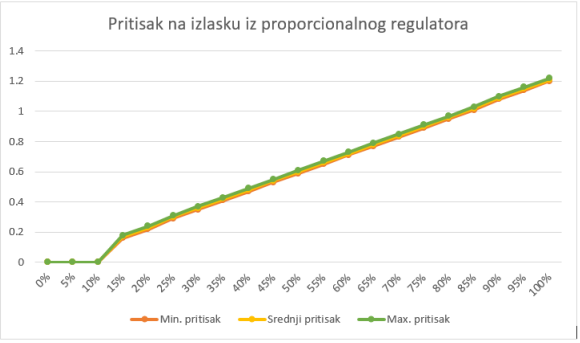
Како би се поставили структурни блокови дијаграма, потребно је применити скуп правила који су дефинисани за свођење система. Коришћењем правила комбиновања серијски везаних елемената и једначине за свођење система повратног кола, можемо добити преносну функцију система аутоматског управљања приказану изразом (3):

$$G_z(s) = \frac{K_0 * (K_d s^2 + K_p s + K_i)}{(T_0 s + 1)s + K_0 * (K_d s^2 + K_p s + K_i)} \qquad (3)$$

4.1. Подешавање PID параметара у TIA Portal софтверу

PID регулација ваздуха под притиском се врши креирањем новог data block (DB) у TIA Portal софтверу, дефинисањем улаза и излаза из креираног блока, као и подешавањем PID параметара самог система. Овај DB на улазу очекује жељену вредност која се задаје на Setpoint улазу, као и тренутну вредност која се доводи на улаз Input.

PID регулација система је остварена тако да за 0 % вредности улаза у систем, на његовом излазу добијамо притисак од 0 bar-a, а за 100 % вредности улаза добијамо притисак од 1.2 bar-a, што је уједно и максимална вредност притиска који се може наћи на уласку у флексибилну хватаљку. Излаз из пропорционалног регулатора притиска директно је повезан на флексибилну хватаљку, а на исту грану система је додат сензор притиска како би могли пратити вредност притиска у реалном времену. Након подешавања PID параметара, унете су жењене вредности на улазу у систем. За сваку вредност на улазу, посматра се на који начин систем реагује, притисак у излазној грани из регулатора, као и одзив самог система. На Слици 2 приказане су вредности притиска у излазној грани за жељене вредности 0-100 %.



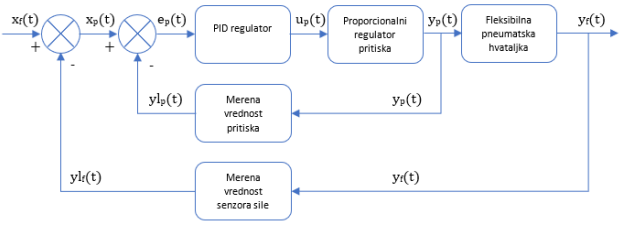
Слика 2. Вредност притиска у зависности од задатих вредности на улазу у PID

Са Слике 2 можемо видети да је наш систем линеаран. Најниже вредности притиска нису очитане због физичких ограничења сензора притиска који је додат на грану излаза из пропорционалног регулатора. Уношењем свих познатих параметара у преносну функцију добија се коначна преносна функција приказана изразом (4):

$$G_z(s) = \frac{0.029575s^2 + 0.2174s + 0.3705}{0.049575s^2 + 1.2174s + 0.3705} \qquad (4)$$

5. ИНТЕГРАЦИЈА СЕНЗОРА СИЛЕ У СИСТЕМ АУТОМАТСКЕ РЕГУЛАЦИЈЕ ПРИТИСКА

У систем су интегрисана три сензора силе (по један на сваки прст хватаљке), па се на овај начин добија повратна информација о сили. Увођењем повратне информације са сензора, систем добија могућност детекције стварне контактне силе. Овим добијамо процену тренутног стања хватања у зависности од добијених вредности са сензора, одређивање да ли је потребно повећати или смањити притисак у систему и информацију да ли је предмет ухваћен или не. На Слици 3 приказана је блок шема интеграције сензора силе у систем аутоматске регулације притиска.



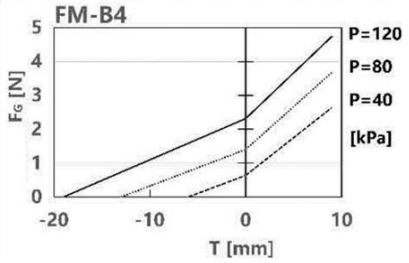
Слика 3. Вредност притиска у зависности од задатих вредности на улазу у PID

5.1. Дијаграм силе хватања, вредност притиска и вредности на сензору силе

Вредности на дијаграму са Слике 4 су одређене под следећим условима:

- Материјал прста мора бити стандардан
- Врх прста и отисак на дну морају бити LS1
- Објекат који се хвата мора бити квадратног облика
- Само врхови прстију хватају предмет
- За величину прста B, дужина додира прста са предметом је LG = 15 mm.

Приказани подаци на Слици 4 су само за референцу и вредности могу варирати у зависности од других радних услова.



Слика 4. Дијаграм силе хватања за стандардан материјал прста [5]

Тестирањем у пракси и испуњавањем горе наведених услова, можемо увезати дијаграм силе хватања са вредностима са сензора силе. Практична изведба приказана је на Слици 5.



Слика 5. Тестирање хватаљке и очитавање вредности са сензора силе

Два FM-B4V5/LS1 модула флексибилних прстију направљена од стандардних материјала хватају чврст правоугаони предмет врховима прстију. Ширина предмета је W = 45 mm, растојање између прстију Dn = 45 mm, дужина контакта са прстом је LG = 15 mm, па еластична деформација износи 0 mm.

Комбиновањем графика са Слике 2, дијаграма силе са Слике 4 и очитаних вредности са сензора силе, можемо да увежемо вредности сензора силе са вредностима притиска унутар прстију флексибилне хватаљке, као у Табели 1.

Табела 1. Однос између регулатора притиска, унутрашњег притиска хватаљке, очитане силе и силе дејства на предмет

Вредност на регулатору притиска	Вредност притиска унутар прстију флексибилне хватаљке	Просечна очитана вредност са сензора силе	Вредност силе F_G којом делујемо на предмет
35 %	0.42 bar	7850	0.7 N
65 %	0.78 bar	6500	1.4 N
100 %	1.20 bar	5800	2.3 N

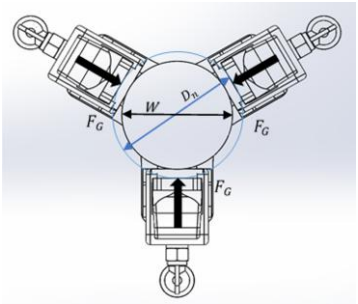
Приказане вредности у Табели 1 служе само за референцу и вредности могу варирати у зависности од других радних услова. Ове вредности не важе за другачије случајеве где имамо другачије објекте који се хватају, различита места хватања истог објекта, другачију површину хватања, већи број прстију или другачије растојање између прста и објекта који се хвата, али нам помажу да имамо оквиран увид о којим се силама ради.

6. СТУДИЈЕ СЛУЧАЈА

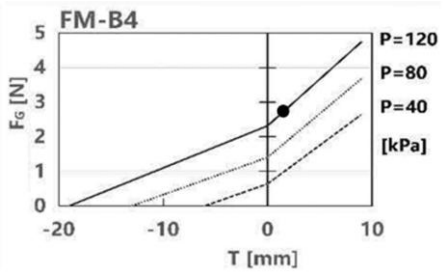
У даљем тексту су приказане три студије случаја: хватање лоптице за стони тенис, хватање киндер јајета и хватање пластичне чаше. Добијени резултати за сваки од три примера су приказани и анализирани.

6.1. Прорачун силе хватања лоптице за стони тенис

Код првог примера је извршено тестирање хватања чврстог сферног предмета - пластичне лоптице за стони тенис. Пречник лоптице износи W = 40 mm, ваздух под притиском је P = 120 kPa, а дужина контакта са прстом је приближно LG = 15 mm. Пречник растојања између прстију износи Dn = 47 mm, па еластичну деформацију можемо прорачунати: T = (W - Dn) / 3 = 2.33 mm.
На Слици 6 можемо видети димензије лоптице и хватаљке, док на Слици 7 можемо видети дијаграм за прорачун силе која делује на лоптицу за стони тенис.



Слика 6. Димензије лоптице и хватаљке



Слика 7. Дијаграм за прорачун силе која делује на лоптицу за стони тенис [5]

Читањем графика са Слике 7 лако можемо одредити колико износи сила којом хватамо сферни предмет: F_G = 2.7 N.

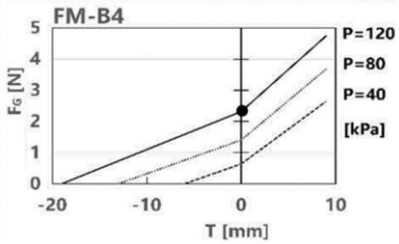
6.2. Прорачун силе хватања киндер јајета

Код другог примера је извршено тестирање флексибилних прстију који хватају киндер јаје, приказано на Слици 8.



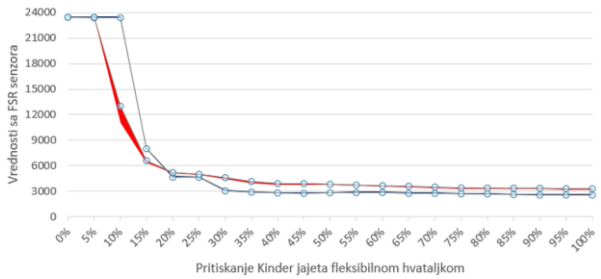
Слика 8. Хватање киндер јајета

Пречник киндер јајета у делу где се хвата износи W = 45 mm, ваздух под притиском је P = 120 kPa, а дужина контакта са прстом је приближно LG = 15 mm. Пречник растојања између прстију износи Dn = 47 mm, па еластичну деформацију можемо прорачунати: T = (W - Dn) / 3 = 0.67 mm. Читањем графика са Слике 9 можемо одредити колико износи сила којом хватамо киндер јаје: F_G = 2.3 N.



Слика 9. Дијаграм за прорачун силе која делује на киндер јаје [5]

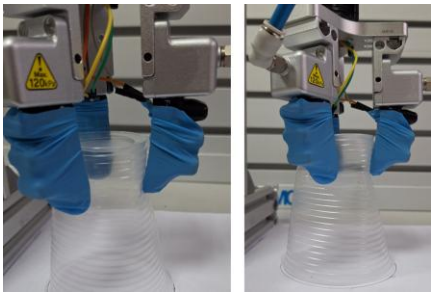
На Слици 10 приказана су два различита мерења истог киндер јајета. Минимална тачка одзива сензора силе јавља се знатно раније код хватања киндер јајета него код хватања лоптице за стони тенис. Ова разлика је последица различитих димензија објеката који се хватају. Такође, на Слици 10 може се приметити да очитане вредности нису идентичне при два мерења истог објекта. До овакве разлике долази када се објекат не постави на исто место хватања. Из овог може се закључити да је поновљивост позиционирања објекта приликом хватања од кључног значаја како би очитане вредности са сензора биле идентичне и предвидљиве.



Слика 10. Вредности сензора силе у приликом хватања киндер јајета на два различита места

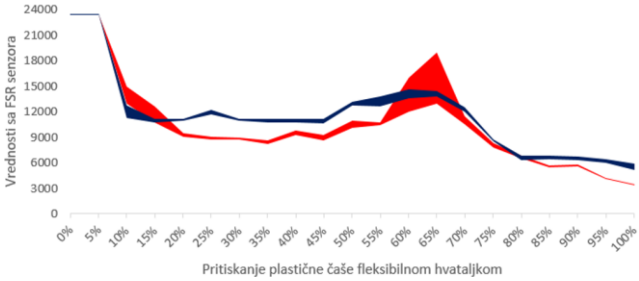
6.3. Хватање пластичне чаше у њеном средишњем делу

На Слици 11 је приказано хватање пластичне чаше у њеном средишњем делу. Може се уочити одређеним тренуцима чаша трпи пластичне деформације, што директно утиче на очитане вредности добијене са сензора силе.



Слика 11. Хватање пластичне чаше у њеном средишњем делу

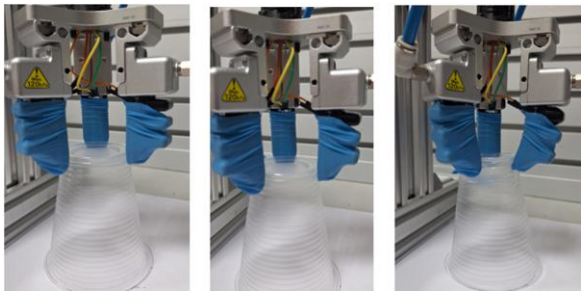
На Слици 12 приказана су мерења две различите пластичне чаше са хватањем на њиховом средишњем делу. Димензије чаше, као и њене пластичне особине доводе до значајних осцилација у вредностима очитаним са сензора силе, због чега не можемо са сигурношћу закључити да ли је чаша лепо ухваћена или се налази у стању деформације. Минимална тачка одзива сензора силе појављује се одмах након 5 % максималног притиска, али у том подручју вредности веома осцилују. Може се уочити да се сила хватања повећава као и код чврстих предмета. При даљем повећању притиска у флексибилној хватаљци очекивало би се додатно смањење напона, али услед пластичних деформација долази до смањења додирне површина између чаше и хватаљке, што се манифестује порастом напона и привидним смањењем силе хватања. У том тренутку осцилације вредности са сензора постају значајно изражене. Након завршетка фазе пластичне деформације, даљи пораст притиска опет доводи до повећања силе на сензору. Овакво хватање пластичне чаше се показује као изразито непоуздано, јер није могуће разликовати да ли је пораст напона последица лошег хватања чаше или њене пластичне деформације. Због тога се је потребно променити приступ и позиција хватања, при чему се најчешће бира део чаше са најмање пластичних деформација – сам руб.



Слика 12. Вредности сензора силе приликом хватања две пластичне чаше у њеним средишним деловима

6.4. Хватање пластичне чаше за руб чаше

На Слици 13 приказано је хватање чаше за њен руб. Уочава се да је контактна површина између флексибилне хватаљке и чаше знатно мања, као и да су деформације које настају приликом хватања минималне.



Слика 13. Хватање пластичне чаше за њен руб

На Слици 14 приказане су вредности очитане са сензора силе приликом хватања пластичне чаше у њеном доњем делу. Како је пречник чаше у овој зони знатно мањи, минимална потребна сила за детекцију постиже се при већем притиску у односу на случај у претходном примеру. На графикону се јасно види да су осцилације са сензора силе знатно мање него у случају хватања чашу у средњем делу, што указује на стабилнији контакт и мањи степен деформације. Након тренутка од 70 % максималног притиска, јављају се благе пластичне деформације које утичу на вредности. Већ након 75 % максималног притиска, вредности сензора поново показују стабилан тренд опадања отпорности и напона, па се може закључити да су пластичне деформације биле минималне и краткотрајне. На основу резултата мерења може се закључити да је дно чаше најпогодније место за хватање оваквих типова пластичних чаша, јер се у том подручју јављају најмање деформације.



Слика 14. Вредности сензора силе приликом хватања две пластичне чаше за њихов руб

6.5. Дискусија

Анализом извршених мерења може се уочити да пиезорезистивни сензор силе показује поуздано и предвидиво понашање приликом хватања чврстих објеката, док механичке особине самог објекта имају значајан утицај на стабилност очитаних вредности. Код лоптице и киндер јајета, која имају мале еластичне деформације, минимална тачка одзива сензора јавља се релативно рано. Ипак, забележене су разлике у очитавањима истог објекта које потичу од варијација у положају хватања, чиме је потврђено да поновљивост позиционирања има пресудну улогу у стабилности и тачности мерења.

Због изражене пластичности материјала и променљивог пречника, пластичне чаше показују сложеније понашање при хватању. Хватање у средишњем делу доводи до значајних деформација које узрокују велике осцилације у вредностима сензора и онемогућавају поуздану процену стварне силе хватања. Насупрот томе, хватање чаше за њен доњи део даје знатно стабилније резултате у поређењу са хватањем у средишној зони. Осцилације су и даље присутне, али су знатно мање изражене. Свеукупно, резултати показују да је механичко понашање објекта који се хвата кључни фактор у интерпретацији сензорских података. Пиезорезистивни сензор силе даје најстабилније и најпоузданије резултате када су деформације објекта минималне и када је контакт хватаљке са објектом добро дефинисан и поновљив.

7. ЗАКЉУЧАК

У овом мастер раду разматран је развој и унапређење система флексибилних пнеуматских хватаљки са циљем повећања њихове управљивости и проширења могућности примене у индустријски аутоматизованим процесима. Посебан акценат стављен је на интеграцију сензора силе у постојећи пнеуматски систем, као и на регулацију ваздуха под притиском помоћу PID регулатора имплементираног у програмабилно логичком контролеру.

У теоријском делу рада дефинисан је задатак система и извршен је избор кључних компоненти и пројектоване су електрична и пнеуматска шема система.

Имплементацијом PID регулације притиска омогућено је прецизно управљање ваздухом под притиском који делује на прсте хватаљке, док је интеграцијом сензора силе обезбеђена повратна информација о сили хватања. Тиме је остварен значајан корак ка побољшању управљивости флексибилних пнеуматских хватаљки, јер регулација више није заснована искључиво на притиску, већ и на реалном контакту са предметом рада.

Експериментални део рада обухватио је мерења силе при хватању три различита објекта, чиме је анализиран утицај механичких карактеристика објекта на понашање система. Сензор силе даје поуздане и стабилне резултате у условима минималних деформација објекта и поновљивог контакта хватаљке са предметом, а начин и место хватања имају значајан утицај на квалитет мерних података.

На основу добијених резултата може се закључити да интеграција сензора силе у систем аутоматске регулације притиска представља ефикасан начин унапређења флексибилних пнеуматских хватаљки. Овакав приступ омогућава прецизније и сигурније хватање различитих објеката, чиме се повећава флексибилност и применљивост система у индустријским условима.

Упркос оствареним резултатима, идентификовани су и одређени недостаци система који представљају простор за даљи развој и унапређење. Пре свега, пиезорезистивни сензори силе показују осетљивост на промене контактне површине и положаја хватања, што може довести до варијација у мерењу силе. Будућа унапређења могу обухватити примену напреднијих и флексибилнијих сензора силе, развој нових алгоритама регулације који комбинују притисак и силу, као и проширење система додатним сензорима ради боље процене стања хватања.

8. ЛИТЕРАТУРА

[1] R. Rao, „What are End-Effectors? Types of End Effectors in Robotics and Applications“, Smart Robotics, 2024. Dostupno na internet stranici: https://smart-robotics.io/end-effectors/, pristupljeno dana 01.12.2025.

[2] StandardBots, „Different types of end effectors in robotics: Your complete guide“, StandardBots, 2025. Dostupno na internet stranici: https://standardbots.com/blog/types-of-end-effectors-essential-tools-for-industrial-automation, pristupljeno dana 02.12.2025. , DOI: 10.1007/s43154-021-00054-5.

[4] Dr. Vladimir Šinik, „Automatsko upravljanje“, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Zrenjanin, 2018, ISBN: 978-86-7672-231-0, Dostupno na internet stranici: https://www.scribd.com/document/727379538/Automatsko-upravljanje, pristupljeno dana 01.12.2025.

[5] Internet stranica: https://asenc.co.th/gripper/soft_gripper.pdf, preuzet Gripping Force dijagram i pristupljeno dana 15.11.2025.

Кратка биографија:



Момир Ћирковић рођен је у Ужицу 1997. год. Основне академске студије је завршио на Факултету техничких наука у Новом Саду на смеру Мехатроника.
Контакт: momircirkovic19@gmail.com