

**ПОВИШЕЊЕ ЕНЕРГЕТСКЕ ЕФИКАСНОСТИ ПНЕУМАТСКИХ СИСТЕМА  
ИМПЛЕМЕНТАЦИЈОМ ПОВРАТНЕ СПРЕГЕ У АУТОМАТСКИ РЕГУЛАТОР ПРИТИСКА**

**IMPROVING ENERGY EFFICIENCY OF PNEUMATIC SYSTEMS BY IMPLEMENTATION  
OF FEEDBACK CONTROL IN AUTOMATICALLY CONTROLLED PRESSURE REGULATOR**

Николина Дакић, Факултет техничких наука, Нови Сад

**Област – МЕХАТРОНИКА**

**Кратак садржај** – Овај рад приказује један од начина за повишење енергетске ефикасности пнеуматских система регулацијом радног притиска ваздуха под притиском, која се врши коришћењем аутоматског регулатора притиска са повратном спрегом. Да би се симулирао рад континуалног флексибилног производног система, коришћен је флексибилни пнеуматски кружни манипулатор са различитим предметима рада. Детекција предмета рада, на основу које се спознаје његова маса (потребна за одређивање радног притиска), врши се помоћу RFID (Radio Frequency Identification) сензорског склопа.

**Кључне речи:** Енергетска ефикасност, Флексибилни производни системи, Пнеуматски системи

**Abstract** – This paper shows one approach to improving energy efficiency of pneumatic systems by adjusting compressed air operating pressure. Operating pressure regulation is achieved using an automatically controlled pressure regulator with feedback control. To simulate a continual flexible production system, pneumatic circular manipulator was used. The type of the workpieces (the weight of the workpieces) was determined using RFID sensor assembly.

**Keywords:** Energy efficiency, Flexible manufacturing systems, Pneumatic systems

**1. Увод**

Производња представља основно подручје људске делатности - усмерену активност која за циљ има добијање производа корисних за друштво, а чија структура варира у зависности од врсте, квалитета и количине производа [1]. Савремени производни системи су најчешће високо аутоматизовани, нарочито када је у питању серијска производња. Међутим, све чешће се јавља случај да између производа постоје одређене разлике које захтевају прилагођавање управљачких параметара процеса рада у реалном времену. Такав производни систем, који треба да се „прилагоди“ предмету рада којим се тренутно манипулише и захтевима процеса, мора бити флексибилан, што значи да ће моћи да врши своју функцију циља и у измењеним условима околине и параметара процеса рада [1].

**НАПОМЕНА:**

Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Слободан Дудић, ванр. проф.

Флексибилна аутоматизација омогућава честе измене производног програма и подразумева релативно једноставан прелазак са обраде једне врсте предмета рада на другу без измена опреме која учествује у производњи [2]. Да би се овај начин производње реализовао, потребно је омогућити одговарајуће промене управљачких параметара процеса у складу са захтевима система. При томе, потребно је постићи високу продуктивност таквог система.

Међутим, продуктивност није једини захтев који се поставља пред производне системе. Све више се тежи повишењу енергетске ефикасности производних система, односно коришћењу мање количине енергије за вршење истог рада. С обзиром на поменуте разлике између предмета рада, може се догодити да је за производњу или руковање једном врстом предмета рада потребно утрошити мање енергије него за другу врсту предмета рада, што оставља могућност реализације флексибилног производног система где се у зависности од врсте предмета рада параметри процеса могу изменити на начин да се оствари уштеда енергије.

**1.1. Пнеуматски управљачки системи**

Једна од најчешће коришћених врста управљачких система у аутоматизованим процесима су пнеуматски системи. То су системи (уређаји или машине) који за обављање механичког рада користе ваздух под притиском или вакуум [3]. Ваздух под притиском представља један од најдоступнијих извора енергије и његова примена у индустрији је изразито распрострањена. Као такав, користи се за извршавање најразличитијих операција попут паковања, стезања, померања, позиционирања, бушења, стругања, глодања, сечења, пресовања, сортирања, пуњења, обртања, оријентисања делова, итд. С обзиром на чињеницу да су пнеуматски системи широко распрострањени у индустрији, за њихову употребу се постављају исти захтеви као и за производне системе – тежи се томе да ови системи буду енергетски ефикасни, тј. да се остваре уштеде енергије ваздуха под притиском на начин који не омета правилно функционисање система. Један од начина за уштеду енергије ваздуха под притиском је и правилна регулација притиска ваздуха у систему [2].

**1.2. Регулација притиска**

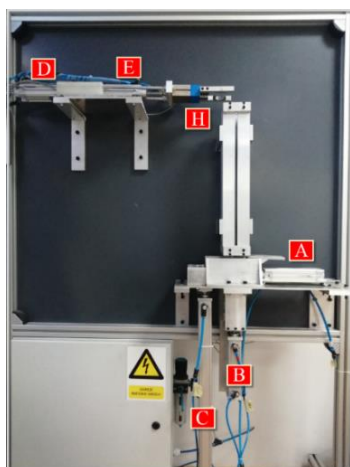
Да би се обезбедиле уштеде ваздуха под притиском у пнеуматским системима, потребно је смањити потрошњу ваздуха под притиском у актуаторима смањењем радног притиска. За већину система

пројектовани радни притисак је 6 bar [3]. Међутим, чест је случај да су предмети рада којима се при производњи рукује различитог типа, те да није потребно утрошити једнаку количину енергије за сваки предмет рада. Пример таквог случаја је производња предмета рада различите масе, за чије су руковање, последично, потребне различите вредности силе, а вредност силе у пнеуматским актуаторима зависи од притиска ваздуха. Због тога је, у овом раду, реализован систем за детекцију предмета рада и регулацију притиска на одговарајућу вредност.

## 2. Експериментални део

### 2.1. Пнеуматски кружни манипулатор

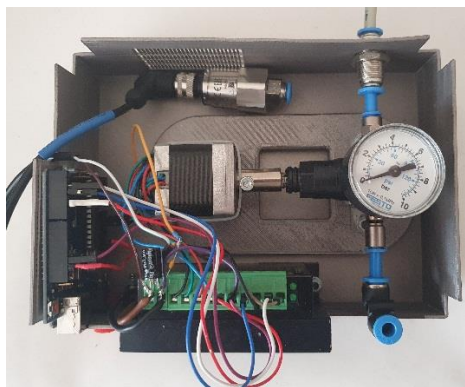
Ради симулације одвијања континуалног производног процеса коришћен је пнеуматски кружни манипулатор, сачињен од пет цилиндара двосмерног дејства (А, В, С, D и E) и једне пнеуматске хватаљке (H), приказан на слици 1. Манипулатор рукује са три врсте предмета рада различите масе: 0,5 kg, 1 kg и 4 kg. За управљање манипулатором користи се програмабилни логички контролер (ПЛК) компаније Festo, FC660.



Слика 1. Пнеуматски кружни манипулатор [2]

### 2.2. Аутоматски управљан регулатор притиска

Како би се омогућила аутоматска регулација радног притиска у пнеуматском систему или једном његовом делу, а у овом случају у једном актуатору (цилиндр С) чија је улога подизање предмета рада, развијен је аутоматски регулатор притиска, приказан на слици 2.



Слика 2. Аутоматски регулатор притиска са интегрисаним сензором притиска

Аутоматски регулатор притиска сачињен је од стандардног регулатора притиска са манометром, корачног електромотора чије је вратило наменски развијеном спојницом повезано са подешавајућим вијком регулатора притиска, драјвера електромотора, Ардуино микроконтролера, одговарајућих прикључака за напајање и кућишта. У зависности од тренутне и жељене вредности притиска, одређује се потребан број корака које треба да направи корачни електромотор како би се подешавајући вијак ротирао за одговарајући угао и тиме обезбедио жељени излазни притисак ваздуха. Првобитна реализација овог регулатора [4] подразумевала је рад у отвореној спрези, при чему се задавао одговарајући, израчунати број корака електромотора без мерења достигнуте вредности притиска.

У циљу добијања тачнијих резултата и бољег управљања, имплементирана је повратна спрега и тиме је омогућен рад аутоматског регулатора притиска у затвореној спрези, коришћењем сензора притиска који је постављен на излазу регулатора и помоћу којег је могуће пратити вредност притиска излазног ваздуха. Већа између броја корака корачног електромотора и вредности притиска одређена је експериментом. Комуникација између регулатора притиска и њему надређеног уређаја (мастера) остварује се серијском везом.

### 2.3. Систем за детекцију предмета рада

Детекција предмета рада врши се помоћу RFID сензорског склопа [5] приказаног на слици 3.

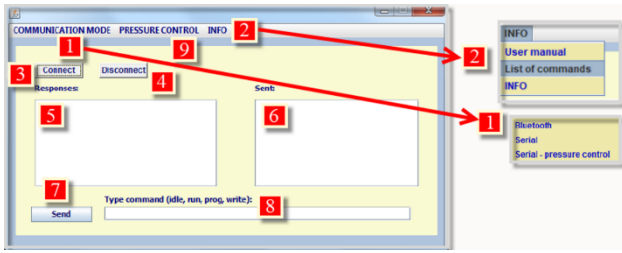


Слика 3. Сензорски RFID склоп за детекцију предмета рада [2]

Приказани уређај се састоји од микроконтролера ESP32, MFRC522 модула задуженог за упис и читање података са RFID тага, извора напајања и пластичног кућишта. На предмете рада налепљени су анти-метални RFID тагови у виду налепница у које су уписане информације о предмету рада на основу којих се одређује вредност притиска потребна за руковање тим предметом рада. Уређај прикупља податке при фреквенцији 13,56 MHz и може се повезати са рачунаром или другим надређеним уређајем на један од два начина: USB/UART протокол или Bluetooth протокол.

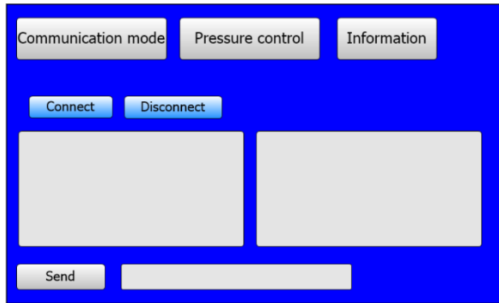
### 2.3. Развијена корисничка апликација

Да би се очитавале информације о предметима рада помоћу RFID сензорског склопа и слале одговарајуће наредбе регулатору притиска потребно је обезбедити комуникацију између ових уређаја. За ту сврху, у раду [2] развијена је Java апликација чији је изглед приказан на слици 4.



Слика 4. Изглед развијене Java апликације [2]

Чињеница да се претходно приказани уређаји морају повезати на рачунар представља проблем за реалне пнеуматске системе, па је накнадно, да би се остварила већа независност уређаја и избегла потреба за рачунаром имплементиран ЛЕД дисплеј mikromedia 5 for TIVA компаније Mikroelektronika, који користи микрочип TM4C129XNCZAD, произвођача Texas Instruments. Програм је написан у VisualBasic програмском језику а изглед почетног екрана приказан на слици 5.



Слика 5. Изглед ЛЕД дисплеја

Приказани дисплеј може се инсталирати у (адаптирано) кућиште регулатора притиска и самим тим се смањује површина коју овај систем за детекцију предмета рада и регулацију притиска заузима, као и цена, која би била неоправдано велика у случају када би се рачунар користио само за потребе овог система.

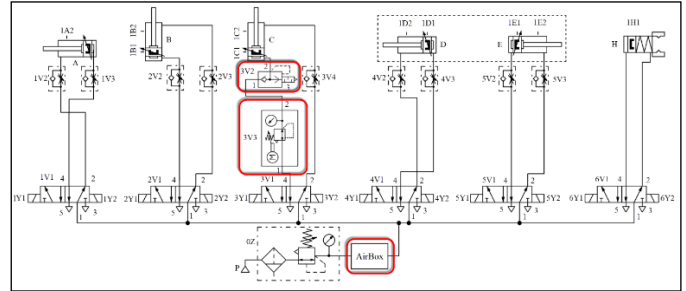
#### 2.4. Ток извођења експеримента

Како би се одредила потрошња ваздуха под притиском, а затим и уштеда енергије у пнеуматском систему коју имплементација приказаних компоненти може да донесе, као и какав је утицај те имплементације на време извршавања циклуса рада, извршен је низ мерења на експерименталној поставци. Сликровити приказ комуникације између компоненти поменуте поставке дат је на слици 6.



Слика 6. Комуникација између компоненти експерименталне поставке

Пнеуматска управљачка шема овако повезаног система приказана је на слици 7.



Слика 7. Пнеуматска управљачка шема [2]

### 3. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

С обзиром на чињеницу да се подешавање притиска врши у реалном времену и да предмети рада могу наилазити насумичним редоследом, што значи да у граничном случају сваки предмет рада може бити другачији од претходног, потребно је утврдити да ли имплементација аутоматски управљаног регулатора притиска успорава систем. У табели 1 су приказана времена потребна за промену положаја регулатора у односу на тренутни и задати притисак, у случајевима карактеристичним за овај систем а то су притисци од 2 bar, 4 bar и 6 bar.

Табела 1. Време потребно за подешавање притиска у актуатору помоћу аутоматског регулатора притиска

Опсег промене притиска (bar)	Време потребно за подешавање притиска (s)
2 (2 - 4 bar и 4 - 6 bar)	1,30
4 (2 - 6 bar)	2,30

На основу резултата из табеле 1, види се да је највише времена потребно за промену притиска у опсегу од 4 bar ( $t = 2,3$  s). Међутим, с обзиром на то да аутоматски регулатор притиска ради паралелно са другим актуаторима и да од тренутка детектовања врсте предмета рада до почетка извлачења клипњаче цилиндра С прође  $t = 3,2$  s, може се закључити да приказани регулатор притиска не ствара никакве застоје у приказаном систему.

Како би се одредила потрошња ваздуха под притиском у различитим условима рада пнеуматског система, односно при различитим комбинацијама наиласка предмета рада које условљавају промене притиска у систему, потребно је мерити проток ваздуха под притиском током времена. Мерење протока врши се помоћу AirBox уређаја компаније Festo, који као резултат мерења на излазу даје табелу у .csv формату и график у .jpg формату.

Након мерења протока, потрошња ваздуха под притиском добија се помоћу једначине 1:

$$Q = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (t_i - t_{i-1}) (q_i + q_{i-1}) \quad (1)$$

где је:

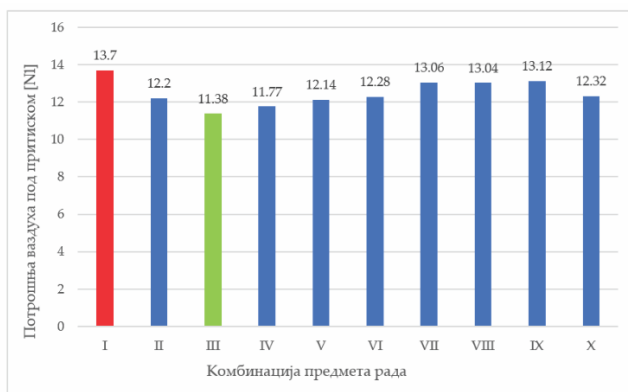
$Q$  – укупна потрошња ваздуха под притиском (NI),  
 $t_i$  – време мерења (s),  
 $t_{i-1}$  – претходно време мерења (s),  
 $q_i$  – вредност протока у тренутку  $t_i$  (NI/min),  
 $q_{i-1}$  – вредност протока у тренутку  $t_{i-1}$  (NI/min).

На пнеуматском кружном манипулатору је извршено десет мерења ради добијања тачнијих резултата, током којих су се јављале различите комбинације предмета рада. Свако мерење подразумевало је десет циклуса рада манипулатора. У табели 2 приказане су комбинације предмета рада коришћене приликом мерења и одговарајуће промене притиска.

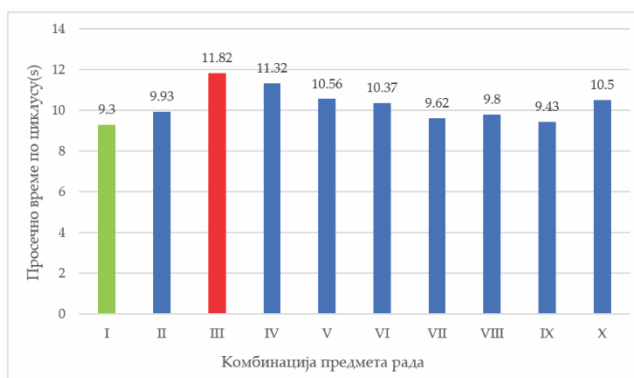
Табела 2. Комбинације напласка предмета рада и одговарајуће промене радног притиска [2]

Мерење	Комбинација предмета рада	Радни притисак (bar)
I	3-3-3-3-3-3-3-3-3-3	6
II	2-2-2-2-2-2-2-2-2-2	4
III	1-1-1-1-1-1-1-1-1-1	2
IV	1-1-1-3-1-1-1-1-3-1	2-6-2-6-2
V	1-2-1-2-1-3-1-2-3-2	2-4-2-4-2-6-2-4-6-4
VI	2-2-3-1-2-2-1-3-1-2	4-6-2-4-2-6-2-4
VII	3-3-3-1-3-3-2-3-3-3	6-2-6-4-6
VIII	1-3-3-3-3-3-3-1-3-3	2-6-2-6
IX	3-3-3-3-2-3-2-3-3-3	6-4-6-4-6
X	1-2-3-2-1-3-1-3-2-1	2-4-6-4-2-6-2-6-4-2

На сликама 8 и 9 приказани су графици са просечним вредностима потрошње ваздуха под притиском целог система и протеклог времена по једном циклусу.



Слика 8. Просечна потрошња по циклусу [2]



Слика 9. Просечно утрошено време по циклусу [2]

На основу добијених резултата може се приметити да је при руковању најлакшим предметима рада вредност потрошње ваздуха под притиском најмања, док је време трајања циклуса највише. За најтежи предмет рада потрошња ваздуха под притиском је највиша, али се циклус најбрже изврши. Све остале комбинације предмета рада узимају вредности које су између ових, граничних вредности.

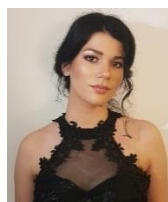
#### 4. ЗАКЉУЧАК

Резултати овог истраживања показали су да, док са једне стране смањење радног притиска ваздуха у складу са променљивим захтевима производног процеса чини систем енергетски ефикаснијим, са друге стране, у одређеним случајевима, долази до продужења времена трајања циклуса рада, што може негативно утицати на продуктивност датог система. С тим на уму, остаје на кориснику да у зависности од карактеристика и захтева система одлучи да ли је имплементација оваквог прилаза одговарајућа за систем који се разматра.

#### 5. LITERATURA

- [1] И. Ћосић, Д. Шешлија, П. Видицки, „Основе индустријског инжењерства и менаџмента – системски прилаз“, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2020.
- [2] S. Dudić, V. Reljić, D. Šešlija, N. Dakić, and V. Blagojević, “Improving Energy Efficiency of Flexible Pneumatic Systems”, *Energies*, Vol. 14, no. 7: 1819, 2021. doi: <https://doi.org/10.3390/en14071819>
- [3] Д. Шешлија, „Аутоматизација процеса рада – пнеуматске компоненте и системи“, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2020.
- [4] П. Кнежевић, „Развој и тестирање даљински управљаног регулатора притиска за пнеуматске системе“, дипломски рад, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2019.
- [5] М. Ковач, „Развој система за комуникацију између предмета рада и флексибилног пнеуматског система“, дипломски рад, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2019.

#### Кратка биографија:



**Николина Дакић** рођена је у Новом Саду 1996. године. Мастер рад на Факултету техничких наука из области Мехатронике - Мехатроника, роботика и аутоматизација одбранила је 2021. године.  
 контакт: [nikolinadakic@uns.ac.rs](mailto:nikolinadakic@uns.ac.rs)