

# Предиктивни модел машинског учења у интерпретабилности архитектуре мјерно-управљачких система са симулационим моделом терморегулационог управљања PID контролером

Милорад К. Бањанин

Универзитет у Источном Сарајеву  
Филозофски факултет – Катедра за рачунарске науке и  
системе, Пале  
[milorad.banjanin@ffuis.edu.ba](mailto:milorad.banjanin@ffuis.edu.ba), [banjanin@uns.ac.rs](mailto:banjanin@uns.ac.rs)

Милан Васиљевић, Стојан Симић, Мирко Стојчић

Универзитет у Источном Сарајеву  
Саобраћајни факултет, Добој  
[milan.vasiljevic@sf.ues.rs.ba](mailto:milan.vasiljevic@sf.ues.rs.ba), [stojans@modrica.oil](mailto:stojans@modrica.oil),  
[mirko.stojcic@sf.ues.rs.ba](mailto:mirko.stojcic@sf.ues.rs.ba)

**Сажетак**— Интерпретабилност архитектуре мјерно-управљачких система представља перцептивни механизам који омогућава разумијевање и интерпретацију њиховог функционисања. Генерално, истраживање се бави питањем како инкорпорирати напредне алгоритме и технике машинског учења кроз интерпретабилност основне архитектуре мјерно-управљачких система, развијајући на тај начин нове моделе истог система, који су погодни за анализу компонената са различитих аспеката, као што је концептуални, компаративни и функционални. Конкретно, помоћу симулације терморегулационог система у реалном времену прикупљени су подаци о вриједностима сигнала који егзистирају у систему. Обрадом добијених података алгоритмом линеарне регресије, гдје је за зависну варијаблу одабран излазни сигнал PID контролера, креиран је модел система који указује на значајну ефикасност PID контролера, а то је минимизирање вриједности грешке.

**Кључне ријечи**— регресиона анализа; PID контролер; интерпретабилност; архитектура мјерно-управљачких система;

## I. УВОД

Уочљиво је да се у почетном дијелу наслова овог рада фокусира појам *интерпретабилности* који се, у својству атрибута, односи на ефикасност једне од најзначајнијих компоненти основне архитектуре мјерно-регулационих система, у овом случају PID контролера. Због тог фокуса треба указати на битне семантичке дистинкције између *интерпретабилности* и *интерпретације*.

*Интерпретација* је објашњење значења неког термина, концепта, текста, ситуације, догађаја или појаве. Има за циљ појашњење, односно, тумачење онога што се посматра, дефинише, представља или изводи у одређеном комуникационом контексту [1]. *Интерпретабилност* се односи на анализу варијабли, података и детерминишућих фактора који имају највећу дискриминативну снагу, у циљу њиховог груписања у смислене цјелине. То значи да у научном истраживању, интерпретабилност представља

идентификовање и анализу варијабли и података који имају одређен статистички, али и аналитичко-креативни значај са потпуним разумијевањем резултата истраживања који се групишу у смисаоним цјелинама (као што су модели, производи, системи, модули, алгоритми, процесне структуре или апликације у конзистентном методолошком поступку).

У савременом свијету, мјерење и контрола су посебни процедурални поступци од великог значаја за постизање тачности, прецизности и ефикасности у различитим индустријским системима и научним истраживањима. Мјерно-управљачки системи (*Measurement and Control Systems*) су сложени конструкциони системи који обављају прикупљање, обраду и анализу података, као и управљање различитим процесима на основу тих података. Интерпретабилност основне архитектуре ових система је фундаментална за њихово разумијевање и правилну примјену.

Машинско учење се односи на компјутерске алгоритме који повећавају своје способности аутономно кроз оријентације на податке. Процес учења може бити надгледан, без надзора или заснован на условљавању. У надгледаном учењу, инстанце (I) са карактеристикама (X) користе се за тренирање модела користећи поуздане циљне информације (T) за сваку инстанцу [2]. Међутим, утицај машинског учења и вјештачке интелигенције на системе управљања је и даље ограничен у поређењу са њиховим утицајем у другим областима [3]. Стога се, основни циљ овог рада односи на указивање могућности примјене регресионих алгоритама као једне од техника машинског учења у области мјерно-управљачких система.

Такође, још један од циљева овог рада је да се интерпретирају најзначајнији концепти основне архитектуре мјерно-управљачког система. У овом контексту, анализирају се главне компоненте система, њихова интеракција и начин на који доприносе остваривању задатих циљева. Фокус је на четири кључне

компоненте процесних структура мјерно-управљачког система: **трансформациони процес**, **процес мјерења**, **процес евалуације** и **процес контроле**.

Етимолошки, **процес** (трансформације, обраде, производње) представља ток акција, активности и догађаја у систему чије се улазне вриједности варијабле (манипулативне) конвертују (трансформишу, комбинују, обрађују, надгледају, истражују) у излазне (контролне) вриједности варијабле, док **мјерење** подразумева прикупљање података о стању система кориштењем различитих сензора. **Евалуација** обухвата анализу и обраду прикупљених података како би се добиле релевантне информације за доношење одлука. **Контрола**, као завршни процедурни корак, подразумева примјену одлука и стартовање актуатора за регулисање процеса и постизање жељених вриједности контролисаних варијабли.

У раду су детаљно објашњене све наведене компоненте, њихове функције и значај. Интерпретација наведених концепата има за циљ креирање контекста за правилно перципирање основне архитектуре мјерно-управљачких система.

Интерпретабилност основне архитектуре мјерно-управљачког система конкретизована је анализом симулационог модела динамичког терморегулационог система креираног у *Simulink* софтверском пакету за графичко пројектовање динамичких система.

У раду се интерпретирају и основни принципи рада PID (proportional-integrative-derivative) контролера, чијом је имплементацијом у симулациони модел остварено аутоматско управљање.

Из добијених података у реалном времену, регресионим алгоритмом машинског учења, креиран је предиктивни симулациони модел функционисања PID контролера у симулационом моделу терморегулационог система. Дакле, креиран је још један симулациони модел у коме је аутоматско управљање реализовано предиктивним моделом PID контролера.

Компаративном анализом одзива та два симулациона модела система изведени су закључци о начину функционисања PID контролера и њиховом доприносу у ефектном и ефикасном функционисању мјерно-управљачких система.

## II. ОСНОВНА АРХИТЕКТУРА МЈЕРНО-УПРАВЉАЧКИХ СИСТЕМА

**Систем** се дефинише као комплексна матрица компонената или елемената у интеракцији који циљно функционишу [1].

**Трансформациони процес** је низ акција, активности и догађаја које се извршавају у одређеном редослиједу са циљем постизања одређеног резултата. Процеси су динамички и интерагују унутар једног система или између више система.

Системи пружају оквир и структуру унутар које се процеси одвијају, док процеси омогућавају трансформацију

улазних података и ресурса у излазне резултате унутар система. Разумијевање оба концепта је кључно за успјешно пројектовање, управљање и оптимизацију како техничких тако и пословних и природних окружења. Три главне процесне категорије варијабле су: улазне или манипулативне, управљачке или контролне и варијабле шума или дистурбативне.

Према [4] архитектура мјерно-управљачког система обухвата четири кључна модула процесне структуре:

- **Модул трансформација** (Трансформациони модул) – скуп акција, активности и догађаја у трансформацији инпута у отпате у систему са фокусом на индикаторе мјерења и управљања. Процесне варијабле су предмет контроле и мјерења. У процесном модулу су укључене све архитектурне компоненте и догађаји који се дешавају у систему и које треба контролисати и регулисати.
- **Модул мјерење** (Мјерни модул) – подразумева прикупљање података о тренутном стању процеса кориштењем сензора и других уређаја за мјерење. Ови подаци су основа за евалуацију и доношење контролних одлука.
- **Модул евалуација** (Евалуациони модул) – односи се на обраду и анализу прикупљених података у циљу процјене тренутног стања процеса. Заправо, евалуација подразумева компарацију стварних вриједности са жељеним вредностима (set point) и прорачун грешке.
- **Модул контрола** (Контролни модул) – укључује примјену корективних акција на процес како би се минимизовала грешка и одржала контролисана величина близу задатих, односно, жељених вриједности. Може укључивати подешавање улазних параметара, активирање актуатора, или промјену радних услова.

Сваки од ових модула има кључну улогу у обезбјеђивању ефикасног и прецизног управљања процесима у систему или повезаним системима.

Опис релација између појединих модула је следећи:

- Трансформација → Мјерење: Стање процеса се континуирано прати помоћу сензора или других мјерних уређаја.
- Мјерење → Евалуација: Добијени подаци на основу мјерења се прослеђују евалуационом модулу гдје се анализирају и врши се процјена грешке у односу на жељену вредност.
- Евалуација → Контрола: На основу анализе и процјене добијених из евалуационог модула, унутар контролног модула се доносе одлуке о потребним корективним акцијама.
- Контрола → Трансформација: Уређаји контролног модула примјењују одлуке и врше корекцију перформанси процеса како би се постигла жељена

вриједност. Ова корекција утиче на процес, те се циклусно понавља.

Описана четири модула представљају основу затворене петље управљања која обезбјеђује континуирано праћење, анализу и корекцију процеса како би се одржале жељене перформансе и стабилност система (Сл. 1).



Слика 1. Затворена петља мјерно-управљачког система[4]

### III. ОСНОВНИ ПРИНЦИП РАДА PID КОНТРОЛЕРА

Према стандардизацији Удружења произвођача електричне опреме (The National Electrical Manufacturers Association NEMA) програмабилни логички контролер, чијој групацији припада и PID, дефинисан је као: „Дигитални електронски уређај који користи програмабилну меморију за памћење наредби којима се захтијева извођење специфичних функција. Обухвата логичке функције, секвенцирање, пребројавање, мјерење времена и израчунавање у циљном управљању различитим типовима машина и процеса преко дигиталних и аналогних улазно-излазних модула“ [5]. Заправо, може се рећи да су контролери кључне компоненте мјерно-управљачких система, који се користе за аутоматизацију и контролу процеса [6]. Они омогућавају прецизно управљање и регулацију вриједности параметара као што су температура, притисак, брзина, проток и ниво. Контролери примају сигнале од сензора, обрађују их и на основу тога шаљу контролне сигнале извршним уређајима.

Алгоритам генерисања контролног сигнала PID контролера заснива се на петљи приказаној на Сл. 2. Укључује одређивање вриједности три главне рачунске компоненте: пропорционалне, интегративне и деривативне, на основу којих је изведен акроним PID [7].



Слика 2. Циклус генерисања контролног сигнала у мјерно-управљачком систему[8]

Приликом извршавања PID петље, одређује се вриједност грешке као разлика између измјерене процесне варијабле и задате вриједности. Контролер, затим, настоји да минимизира ову грешку током времена подешавањем контролних промјенљивих.

Пропорционална рачунска компонента генерише излазну вриједност пропорционалну тренутној вриједности грешке и њена вриједност одређена је математичком формулом:

$$P = K_p e(t) \quad (1)$$

гдје је  $K_p$  коефицијент пропорционалности, док је  $e(t)$  грешка у функцији времена.

Интегративна рачунска компонента је пропорционална и величини грешке и трајању грешке, што је чини кључном за дугорочну тачност. Рачуна се формулом:

$$I = \frac{K_i}{T} \int_0^T e(t) dt \quad (2)$$

гдје је  $K_i$  коефицијент интегративности, а  $T$  период мјерења грешке.

Дериватна компонента се одређује на основу брзине промјене грешке, омогућавајући предвиђање будуће вриједности грешке на основу тренутне брзине промјене и дата је изразом:

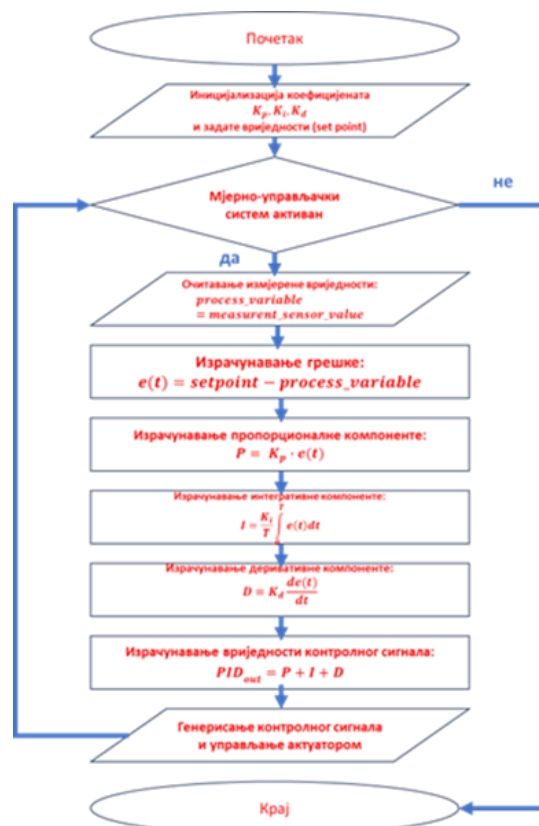
$$D = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3)$$

гдје  $K_d$  представља коефицијент деривативности.

Коначна вриједност контролног сигнала представља збир вриједности наведених рачунских компоненти [8]:

$$PID_{out} = P + I + D \quad (4)$$

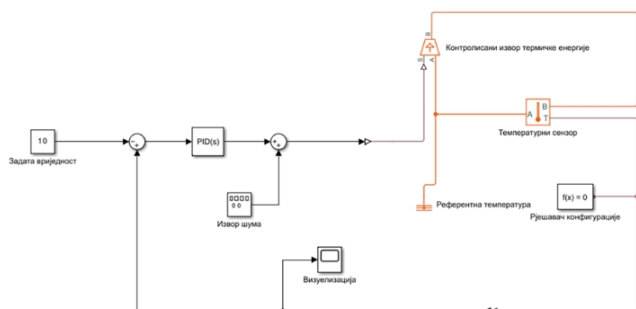
На слици 3. блок-дијаграмом је представљен алгоритам рада PID контролера.



Слика 3. Блок-дијаграм алгоритма рада PID контролера

#### IV. СИМУЛАЦИОНИ МОДЕЛ ТЕРМОРЕГУЛАЦИОНОГ СИСТЕМА

У сврху илустрације основне архитектуре мјерно-управљачког система интерпретираће се симулациони модел терморегулационог система креиран помоћу Simulink софтверског пакета за графичко моделовање динамичких система (Сл. 4).

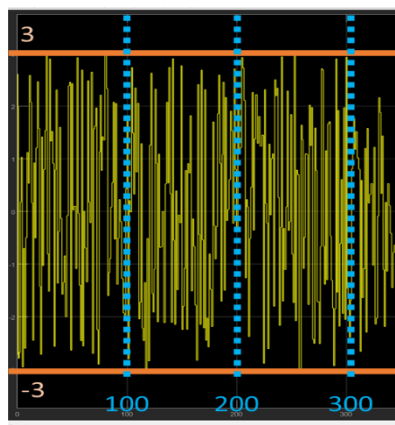


Слика 4. Дизајн симулационог модела терморегулационог система

Основни принцип функционисања овог система је да се у повратној спрezi, на основу грешке, односно, одступања измјерене вриједности од задате вриједности, генерише контролни сигнал од стране PID контролера који подешава актуатор S са циљем да се регулише вриједност температуре извора термичке енергије у складу са жељеном вриједности.

Ниво вриједности температуре контролисаног термичког извора се детерминише на основу извора референтне температуре која је подешена на 0°C, док температурни сензор мјери разлику између вриједности референтне температуре и температуре извора термичке енергије.

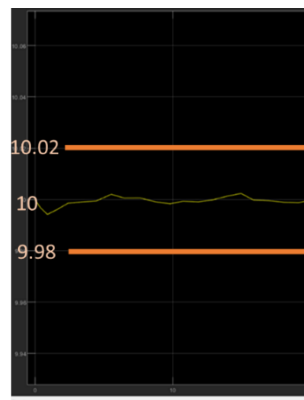
За PID-базирани систем управљања, одзив система зависи од подешавања PID контролера и параметара динамике процеса. Стога, да би се осигурао висок ниво генерализације, потребно је претпоставити најопштији могући модел процеса који обезбеђује баланс између тачности моделовања и једноставности [9]. Из тог разлога извор шума, односно, вриједности сигнала дистурбације су случајно генерисане вриједности (Сл. 5).



Слика 5. Графички приказ сигнала дистурбације

Амплитуда тог сигнала постављена је на вриједност 3, док је фреквенција  $0.01 \frac{rad}{s}$ .

Извршавањем симулације у блоку за визуелизацију формиран је графички приказ одзива система који је представљен на Сл. 6.

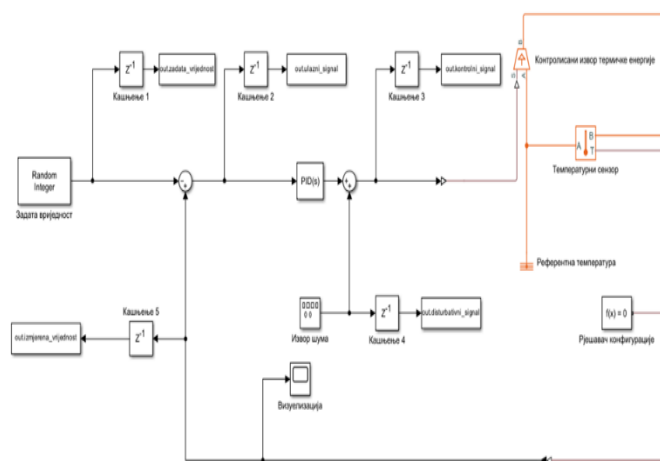


Слика 6. Графички приказ одзива система

#### V. КРЕИРАЊЕ ПРЕДИКТИВНОГ МОДЕЛА PID КОНТОРЛЕРА

Инсертовањем блокова за читавање и меморисање вриједности сигнала који се генеришу у процесу симулације приказаног модела, те подешавањем параметара за реализацију симулације у реалном времену, извршено је формирање сета података који се може искористити за креирање предиктивног модела PID контролера примјеном регресионог алогритма.

Кориговани симулациони модел приказан је на Сл 7. Још један од услова да би се могли прикупити подаци у реалном времену реализације симулације је инсертовање блокова који симулирају кашњење сигнала [10]. Такође, у сврху прикупљања што реалнијих вриједности података, постављено је да се задата вриједност случајно генерише као цијели број у свакој јединици времена (на 1 секунду) из опсега вриједности [0,10]. Дистурбативни сигнал је задржан као у претходној симулацији са случајно генерисаним вриједностима из опсега [-3,3] и фреквенцијом 0.01.



Слика 7. Дизајн симулационог модела за прикупљање података у реалном времену

У процесу симулације прикупљене су вриједности 50000 инстанци атрибута: **вријеме, задате вриједност, измјерена вриједност, улазни сигнал, дистурбативни сигнал, контролни сигнал** чији је сегмент приказан у табели 1.

Табела 1. Извод из табеле прикупљених података покренуте симулације

| Вријеме | Задата вриједност | Измјерена вриједност | Улазни сигнал | Дистурбативни сигнал | Контролни сигнал |
|---------|-------------------|----------------------|---------------|----------------------|------------------|
| 0       | 4                 | 3.995937391          | -0.00406261   | -1.000861809         | -3.995937391     |
| 1       | 9                 | 8.999436662          | -0.00056334   | 2.515581884          | -8.999436662     |
| 2       | 9                 | 8.996875871          | -0.00312413   | -2.615272321         | -8.996875871     |
| 3       | 10                | 10.0000515           | 5.15E-05      | 1.118107208          | -10.0000515      |
| 4       | 6                 | 5.998904706          | -0.00109529   | 0.027846634          | -5.998904706     |
| 5       | 9                 | 9.001527233          | 0.001527233   | 0.01837655           | -9.001527233     |
| 6       | 8                 | 8.00019321           | 0.00019321    | 2.854678877          | -8.00019321      |
| 7       | 6                 | 5.998732461          | -0.00126754   | 2.587879526          | -5.998732461     |
| 8       | 9                 | 8.999969086          | -3.09E-05     | 0.491197465          | -8.999969086     |
| 9       | 1                 | 1.000078479          | 7.85E-05      | -0.444209935         | -1.000078479     |
| 10      | 7                 | 7.004408656          | 0.004408656   | -1.836375608         | -7.004408656     |
| 11      | 7                 | 7.001391489          | 0.001391489   | 0.035147967          | -7.001391489     |
| 12      | 3                 | 2.998668005          | -0.001332     | 2.731886395          | -2.998668005     |
| 13      | 4                 | 3.999007859          | -0.00099214   | 2.814642923          | -3.999007859     |
| 14      | 8                 | 7.999091035          | -0.00090896   | 1.703604617          | -7.999091035     |
| 15      | 9                 | 8.998183801          | -0.0018162    | 0.482790396          | -8.998183801     |

Релациони односи између сигнала који фигуришу у моделу су сљедећи: На основу разлике између **измјерене** и **задате вриједности** генерише се **улазни сигнал** у PID контролер. PID контролер генерише **контролни сигнал** узимајући у обзир утицај **дистурбативног сигнала**. **Контролни сигнал** регулише вриједност температуре извора термичке енергије коју мјери температурни сензор генеришући сигнал који репрезентује **измјерену вриједност**. Поступак се циклусно понавља.

Коришћењем алата софтвера отвореног кода за анализу података и машинско учење - WEKA (Waikato Environment for Knowledge Analysis) примјењен је алгоритам за линеарну регресију на описани сет података чиме је креиран предиктивни модел за детерминисање вриједности контролног сигнала PID контролера. Иначе, Weka је често кориштен софтверски алат за анализу података и машинско учење са широким спектром алгоритама за истраживање, анализу и моделовање података креиран на Универзитету у Ваикато-у на Новом Зеланду [11]. Основни циљ **линеарне регресије** је предикција континуалних нумеричких вриједности, односно успостављање везе између вриједности зависне варијабле и једне или више независних варијабли [12]. У контексту зависне варијабле кориштен је атрибут **Контролни сигнал**, док се остали атрибути сматрају независним варијаблама. Извјештај са карактеристикама модела представљен је на Сл. 8.

Из садржаја извјештаја може се закључити да је предиктивни регресиони модел контролног сигнала дат једначином:

Контролни сигнал =

$$-1 \cdot \text{Задата вриједност}$$

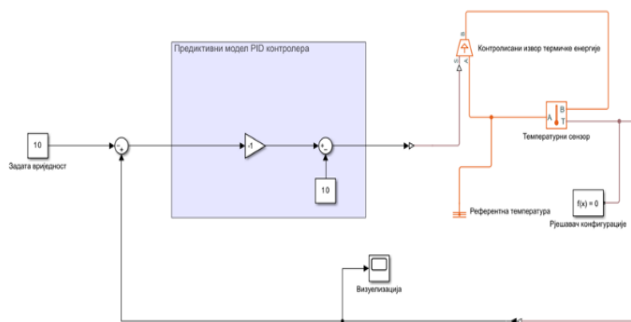
$$-0.9955 \cdot \text{Улазни сигнал}$$

Метрика тачности модела, као што је коефицијент корелације, средња и релативна апсолутна грешка, коријен средње и релативне вриједности квадрата разлике, су скоро идеалних вриједности.

|                                              |                                                                                  |
|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Classifier output                            |                                                                                  |
| Scheme:                                      | weka.classifiers.functions.LinearRegression -S 1 -R 1.0E-8 -num-decimal-places 4 |
| Relation:                                    | najnoviji podaci-2-weka.filters.unsupervised.attribute.Remove-R3                 |
| Instances:                                   | 50000                                                                            |
| Attributes:                                  | 5                                                                                |
|                                              | Vrijeme                                                                          |
|                                              | Zadata vrijednost                                                                |
|                                              | Ulazni signal                                                                    |
|                                              | Disturbativni signal                                                             |
|                                              | Kontrolni signal                                                                 |
| Test mode:                                   | 10-fold cross-validation                                                         |
| === Classifier model (full training set) === |                                                                                  |
| Linear Regression Model                      |                                                                                  |
| Kontrolni signal =                           |                                                                                  |
| -0 * Vrijeme +                               |                                                                                  |
| -1 * Zadata vrijednost +                     |                                                                                  |
| -0.9955 * Ulazni signal +                    |                                                                                  |
| -0 * Disturbativni signal +                  |                                                                                  |
| 0                                            |                                                                                  |
| Time taken to build model: 0.05 seconds      |                                                                                  |
| === Cross-validation ===                     |                                                                                  |
| === Summary ===                              |                                                                                  |
| Correlation coefficient                      | 1                                                                                |
| Mean absolute error                          | 0                                                                                |
| Root mean squared error                      | 0.0001                                                                           |
| Relative absolute error                      | 0.0006 %                                                                         |
| Root relative squared error                  | 0.0046 %                                                                         |
| Total Number of Instances                    | 50000                                                                            |

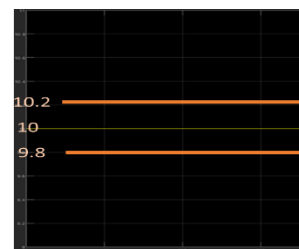
Слика 8. Извјештај о креираном предиктивном моделу рада PID контролера

Резонује се да је могуће извршити супституцију PID контролера у описаном симулационом моделу са модулом који се заснива на линеарној комбинацији блокова за множење коефицијентом и додавањем константе, уз елиминацију извора дистурбације, као што је представљено на слици 9.



Слика 9. Дизајн симулационог модела терморегулационог система управљаног предиктивним моделом PID контролера

На овај начин добија се модел мјерно-управљачког терморегулационог система чији је одзив (слика 10) веома приближан одзиву система чије се функционисање заснива на управљању помоћу PID контролера (слика 6).



Слика 10. График одзива терморегулационог система управљаног предиктивним моделом

Примјена алгоритма линеарне регресије у предикцији динамичких управљачких окружења има одређена ограничења која произилазе из природе саме методе и комплексности динамичких система. Промјене у управљачким окружењима су најчешће посљедице претходних стања система, а линеарна регресија не посједује инхерентни механизам за моделирање временских серија или кашњења. Међутим, у овом раду њена примјена се не односи на предикцију интерних динамичких процеса који се реализују у PID контролеру, тј. његовом начину минимизирања грешке настале дистурбацијама, него се врши анализа и предикција његове ефикасности.

## VI. ЗАКЉУЧАК

Истраживање је показало да је интерпретабилност основне архитектуре мјерно-управљачких система кључна за разумијевање и унапређење њихове функционалности. Анализирајући интеракцију између моула процеса, мјерења, евалуације и контроле, идентификовани су најзначајнији фактори који утичу на перформансе ових система. Поред концептуалне анализе архитектуре мјерно-управљачког система, у раду је предложено рјешење које укључује развој симулационог модела терморегулационог система којим управља PID контролер. Примјеном софтвера за анализу података и машинско учење, попут WEKA, коришћен је алгоритам линеарне регресије за креирање предиктивног модела који оптимизује вриједности контролног сигнала PID контролера. Овај приступ омогућава детаљнији увид у сам начин функционисања PID контролера, те њихову улогу и значај у управљању процесима.

Добијени резултати су показали да замјена традиционалног PID контролера са моделом базираним на линеарним комбинацијама могућа је само у случају отклањања извора дистурбативних сигнала или анулирања њиховог утицаја. Заправо, потврђено је да уколико би услови у којима систем егзистира били идеални, односно, без постојања грешака у мјерењу или појаве дистурбација, била би могућа супституција PID контролера линеарном комбинацијом појачивача и сабирача сигнала.

Примјена напредних алгоритама машинског учења, као што је линеарна регресија, у симулационим моделима показала је значајна побољшања у прецизности и стабилности контроле. Ови резултати могу послужити као основа за будућа истраживања и развој напредних мјерно-управљачких система који ће бити прилагођени различитим индустријским и научним апликацијама, доприносећи тако укупном напретку у овој области.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] M. K. Banjanin, *Naučnoistraživačka metodologija*, 2. izdanje, Beograd: DisPublic, 2008.
- [2] G. Reynoso-Meza, J. Carrillo-Ahumada, i T. Marques, "Multi-objective machine learning for control performance assessment in PID control Loops," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 57, no. 7, pp. 168–173, 2024.
- [3] O. Makke, F. Lin, "Learning in dynamic systems and its application to adaptive PID control," arXiv preprint arXiv:2308.10851, 2023. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2308.10851>

- [4] T. A. Hughes, *Measurements and Control Basics*, ISA, 2015.
- [5] S. Drašković, V. Petrović, H. Milošević, "Primena PLC kontrolera i SCADA sistema u industrijskim postrojenjima," *Zbornik radova, XII međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH - JAHORINA*, Jahorina, 20-22. mart 2013. (str. 495-499)
- [6] Z. Jegeš, M. Adžić, R. Marton, *Upravljanje primenom PLC uređaja*, Subotica: Viša tehnička škola - Subotica, 2005
- [7] "What is PID control algorithm," Veichi Electric, May 27, 2018. [Online]. Available: <https://www.veichi.com/knowledge/what-is-pid-control-algorithm.html>. [Accessed: Jan. 20, 2025].
- [8] U. Waseem, "PID Loops: A comprehensive guide to understanding and implementation," Wevolver, [Online]. Available: <https://www.wevolver.co/m/article/pid-loops-a-comprehensive-guide-to-understanding-and-implementation>. [Accessed: Jan. 20, 2025].
- [9] P. Grelewicz, T. T. Khuat, J. Czczot, P. Nowak, T. Klopot, and B. Gabrys, "Application of machine learning to performance assessment for a class of PID-based control systems," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 53, no. 7, pp. 4226-4238, Jul. 2023
- [10] M. Stojčić, M. K. Banjanin, M. Vasiljević, D. Nedić, A. Stjepanović, D. Danilović, and G. Puzić, "Predictive modeling of delay in an LTE network by optimizing the number of predictors using dimensionality reduction techniques," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 14, p. 8511, Jul. 2023.
- [11] I. H. Witten, E. Frank, L. Trigg, M. Hall, G. Holmes, and S. J. Cunningham, "Weka: Practical machine learning tools and techniques with Java implementations," Hamilton, New Zealand: Univ. Waikato, Dept. Comput. Sci., Working Paper 99/11, 1999.
- [12] M. K. Banjanin, M. Stojčić, D. Drajić, Z. Čurguz, Z. Milanović, and A. Stjepanović, "Adaptive modeling of prediction of telecommunications network throughput performances in the domain of motorway coverage," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 8, p. 3559, 2021.

## ABSTRACT

Interpretability of the architecture of measurement and control systems represents a perceptual mechanism that enables understanding and interpretation of their functionality. Generally, the research addresses the question of how to incorporate advanced algorithms and machine learning techniques through the interpretability of the core architecture of measurement and control systems. This approach develops new models of the same system that are suitable for analyzing components from different perspectives, such as conceptual, comparative, and functional. Specifically, by simulating a real-time temperature regulation system, data were collected on the values of signals existing within the system. By processing the obtained data using a linear regression algorithm, with the output signal of the PID controller selected as the dependent variable, a system model was created. This model highlights the significant efficiency of the PID controller, namely minimizing the error value.

**Keywords:** regression analysis; PID controller; interpretability; architecture of measurement and control systems;

## A PREDICTIVE MACHINE LEARNING MODEL IN THE INTERPRETABILITY OF THE ARCHITECTURE OF MEASUREMENT AND CONTROL SYSTEMS WITH A SIMULATION MODEL OF TEMPERATURE REGULATION USING A PID CONTROLLER

Милорад К. Бањанин  
Милан Васиљевић  
Стојан Симић  
Мирко Стојчић