

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Моторна возила и мотори

Предмет: Мотори СУС 2

Број индекса: 80/2014

Мирослав С. Петровић

**Експериментално одређивање
индикаторског степена корисности
мотора СУС**

Завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Александар Давинић, ванр. проф. - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

Садржај завршног рада треба да обухвати следеће:

- Уводна разматрања
 - Радни процес мотора СУС
 - Карактеристике процеса сагоревања
 - Дефиниција индикаторског степена корисности мотора СУС
 - Утицајни фактори на индикаторски степен корисности мотора СУС
- Опис методе и инсталације за експериментално одређивање индикаторског степена корисности мотора СУС
- Експериментално одређивање индикаторског степена корисности мотора СУС на четворотактном дизел мотору (резултати и дискусија)
- Закључак

Препоручена литература:

- [1] Милић Н. Истраживање оптималног управљања системом паљења ОТО-мотора применом вештачких неуронских мрежа, Докторска дисертација, Машински факултет, Београд, 2012.
- [2] Дорић, Ј. Унапређење ефективности мотора СУС применом неконвенционалног клипног механизма, Докторска дисертација, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2013.

Крагујевац, 16.05.2019.

Ментор:
Др Александар Давинић ванр. проф.

Резиме

У раду је дат кратак увод о самим моторима СУС, њихов принцип рада, примена, конструкција и главни делови који су битни за његов рад. Наведене су методе одређивања индикаторског степена корисности са посебним освртом на одређивање у радним условима. На самом крају је извршено експериментално одређивање индикаторског степена корисности мотора СУС. Циљ рада је увидети како број обртаја и оптерећење утичу на индикаторски степен корисности. Извођење експеримента је организовано тако да се добије довољан број параметара за одређивање ефективних, индикаторских показатеља мотора. Истраживање је спроведено на оригиналном експерименталном мотору у лабораторији за моторе СУС, Факултета инжењерских наука. Приказани су резултати експеримента, као и резултати остварени на различитим режимима рада мотора.

Кључне речи: *мотор, експеримент, индикаторски степен корисности*

Abstract

In the paper it is given short introduction about IC engines, as well as their working principle, application, construction and main parts, which are important for engine work. There was mentioned methods, for indicating efficiency determination, where main accent was placed on determination in working conditions. At the end, it was performed experimental determination of indicated efficiency of the IC engine. The experiment was conducted as such, to obtain enough number of parameters for determination of effective and indicating engine parameters. The research was conducted on original experimental engine, in the laboratory for IC engines, at Faculty of engineering. Are shown results of the experiment, as well as results that are obtained on different engine working regimes.

Keywords: *IC engine, experiment, indicating efficiency*

Садржај

1. Уводна разматрања	1
1.1 Радни процес мотора СУС	2
1.2 Карактеристике процеса сагоревања	3
1.3 Дефиниција индикаторског степена корисности мотора СУС.....	4
1.4 Утицајни фактори на индикаторски степен корисности мотора СУС	4
2. Опис методе и инсталације за експериментално одређивање индикаторског степена корисности мотора СУС	6
2.1 Опис мерне инсталације.....	6
2.1.1 Мерење ефективног обртног момента и броја обртаја мотора	8
2.1.2 Одређивање индикаторских параметара мотора	9
2.1.3 Мерење потрошње горива.....	10
2.1.4 Мерење протока ваздуха	11
2.1.5 Мерење карактеристичних температура	13
2.1.6 Мерење атмосферског притиска.....	14
2.1.7 Мерење диференцијалног притиска.....	14
2.1.8 Мерење притиска у цилиндру мотора – индицирање	15
2.2 Методологија испитивања	19
2.2.1 Избор радних режима	19
3. Експериментално одређивање индикаторског степена корисности мотора СУС на четворотактном дизел мотору (резултати и дискусија)	21
3.1 Резултати експеримента	21
3.2 Дискусија експеримента.....	22
3.2.1 Утицај броја обртаја мотора на индикаторски степен корисности.....	22
3.2.2 Утицај оптерећења мотора на индикаторски степен корисности	23
4. Закључак	24
Литература	25

1. Уводна разматрања

Дизел мотор је мотор с унутрашњим сагоревањем. Као погонско гориво користи дизел и ради према Дизел циклусу. Изумео га је 1892. године немачки инжењер Rudolf Diesel по којем је и добио назив.

Дизел мотор је карактеристичан по томе што нема свећице нити карбуратор а у цилиндру се компримује чист ваздух, који услед високог степена компресије постиже тако високу температуру и притисак да након убризгавања горива у цилиндар мотора долази до његовог самозапаљења. Притисак и температуре у цилиндру су већи него код бензинских мотора, као и степен искоришћења мотора. Спороходни дизел мотори који се користе на бродовима, могу имати степен искоришћења и до 50% већи [1].

Дизел мотори се производе у двотактним и четвортактним верзијама. Ови мотори су се првобитно користили код стационарних парних машина због своје ефикасности. Од 1910. године се користи у подморницама и бродовима да би тек 1930-тих година почео да се користи код аутомобила. Од 1970. године коришћење дизел мотора код аутомобила у САД-у је знатно порасло. У 2007. години око 50 посто свих нових аутомобила продатих у Европи су са уграђеним дизел мотором.

Дизел мотори имају неколико предности у односу на друге моторе с унутрашњим сагоревањем:

- мања потошња горива за исти обављени рад услед више температуре на којој се обавља сагоревање и због бољег експанзионог распона
- не захтевају висок напон електричног система паљења, што резултује високом поузданошћу и једноставнијем прилагођавању влажним условима. Непостојање индукционок калема, свећица итд. такође елиминише извор емитовања фреквенција које могу ометати навигациону и комуникациону опрему, што је посебно важно у морским и авионским апликацијама.
- животни век дизелског мотора уобичајено је око два пута дужи у односу на бензински мотор због повећане чврстоће делова који се користе код ових мотора. Осим тога, дизел гориво има боље особине подмазивања од бензина што утиче на век трајања мотора.
- биодизел се лако синтетише па се може директно користити као погонско гориво у многим дизел моторима, док би у случају бензинских мотора било потребно прилагођавање мотора.

Дизел мотори се могу поделити према броју радних тактова и то на:

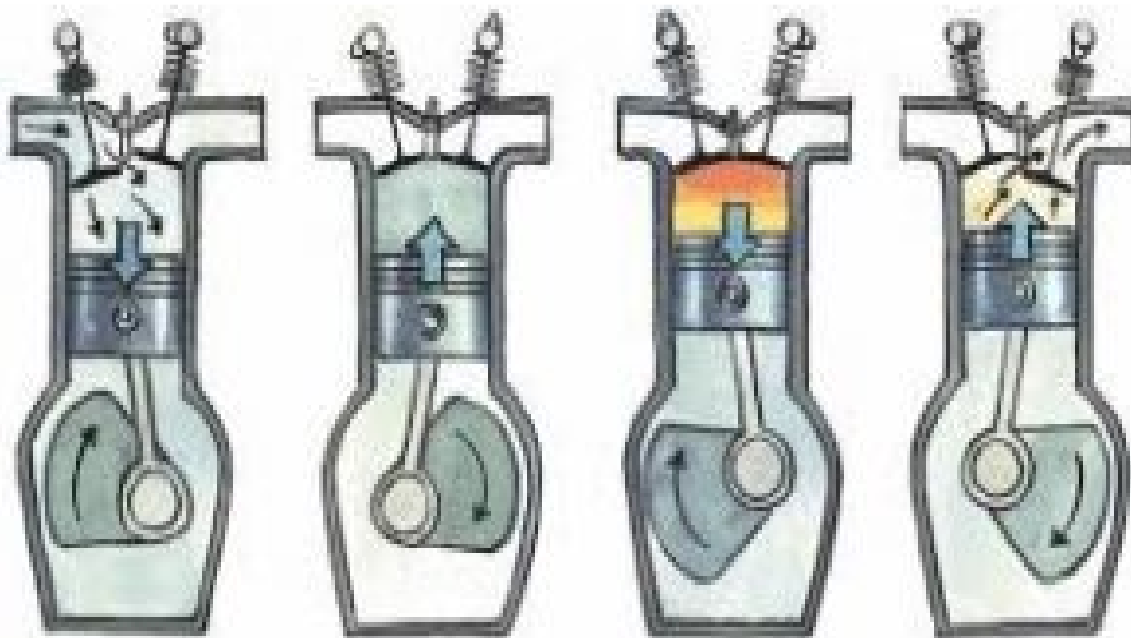
- двотактне
- четвортактне,

Према врсти коришћених нафтних деривата:

- дизел
- дизел – гасни (TNG или KPG).

1.1 Радни процес мотора СУС

Код четвортактних мотора СУС, као што им име каже постоје четири такта у једном радном циклусу који се заврши за два обртања коленастог вратила. Тактови у радном циклусу су: усисавање, сабијање, ширење и издувавање (слика 1). Усисавање почиње у спољној мртвој тачки (СМТ) и завршава се у унутрашњој мртвој тачки (УМТ), у току усисавања преко усисног вода и усисног вентила радна материја улузи у цилиндар. Након такта усисавања почиње такт сабијања, приликом такта сабијања затворена су оба вентила. Клип из УМТ почиње да се креће ка СМТ, долази до пораста притиска и температуре. Код дизел мотора се на крају такта сабијања, под високим притиском, убризгава гориво у виду изузетно малих капљица (магле), које се због високих притисака и температуре пали само од себе, односно долази до samozапалења. Тада почиње радни процес мотора СУС, односно сагоревање. Сагоревањем горива се ослобађа енергија која условљава следећи такт, односно такт ширења. Енергетски оптерећени продукти сагоревања потискују клип испред себе, при чему долази до ширења продукта сагоревања, повећања њихове запремине и пада притиска. Потискивањем клипа остварује се рад који се путем клипног механизма предаје коленастом вратилу и даље потрошачима. Ово је једини радни такт који омогућава покривање сопствених губитака мотора током остала три такта и предају механичке енергије потрошачима. У току такта ширења затворена су оба вентила. Након ширења следи последњи такт радног циклуса мотора СУС, такт издувавања. Издувавање почиње наком УМТ и траје до СМТ, у току издувавања преко издувног вентила и издувне гране се избацују продукти сагоревања из цилиндра, и почиње припрема за нови радни циклус [2].



Слика 1. Принцип рада дизел мотора [3]

1.2 Карактеристике процеса сагоревања

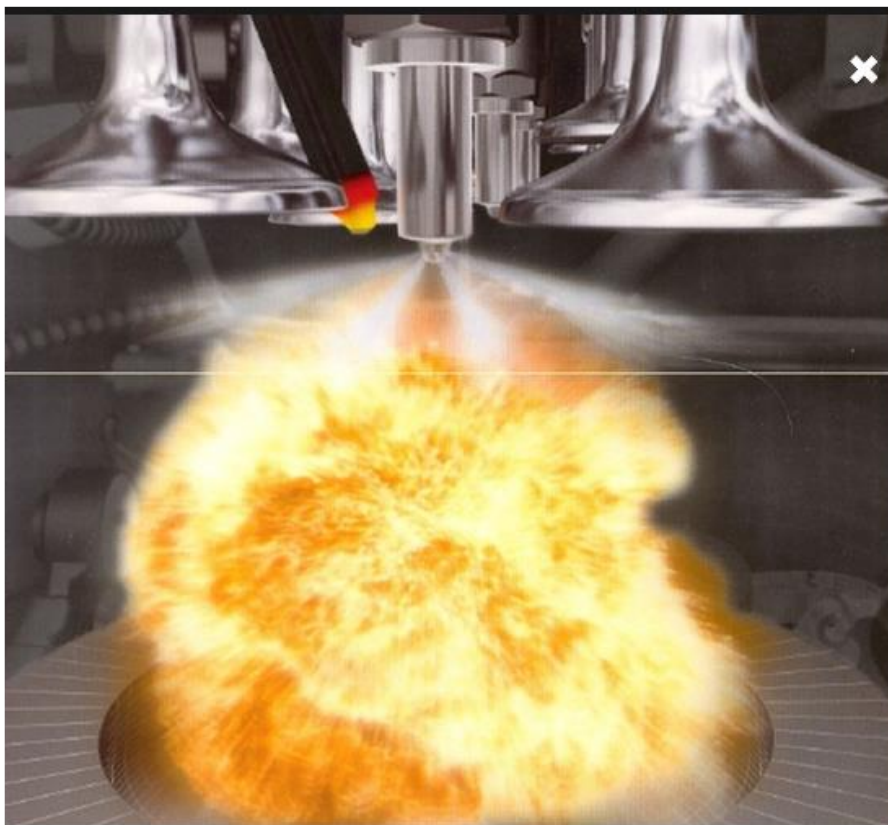
Пре него што се каже било шта о процесу сагоревања, мора се рећи да се код ото и дизел мотора радна материја пали на два различита начина. Код ото мотора постији читав један систем за паљење радне материје, односно радна материја код ото мотора се пали помоћу свећице, док код дизел мотора не постоји страни извор паљења, већ се гориво убризгано у цилиндар пали само од себе услед високог притиска и температуре у цилиндру.

Код оба типа мотора постоја два вида сагоревања, нормално и ненормално. Код ото мотора видови ненормалног сагоревања су детонантно сагоревање и површинско паљење. Код дизел мотора видови ненормалног сагоревања су дизел удари и димност.

Када су дизел мотори у питању, нормално сагоревање (слика 2) почиње на почетку процеса убризгавања горива, траје током целог процеса убризгавања, и завршава се након завршетка убризгавања. Пошто се брызга под високим притиском, дизел гориво у цилиндар улази у виду магле, због високе температуре испарава и меша се са врелим ваздухом у цилиндру и долази до појаве активних центара, од тих центара се пламен шири и на крају обухвати читаву запремину цилиндра.

При раду са горивом које има већу отпорност на самозапаљење, односно мали цетански број, долази до наглог пораста притиска уз више максималне вредности, што доводи до знатног механичког оптерећења мотора. Та појава се назива још и дизел ударом.

При раду са горивом које има малу отпорност на самозапаљење, односно велики цетански број, промена притиска је спорија и нижи су максимални притисци. Ако се користе горива са великим цетанским бројем дизел мотори ће димити.



Слика 2. Процес сагоревања код дизел мотора [4]

1.3 Дефиниција индикаторског степена корисности мотора СУС

Индикаторски степен корисности представља однос топлоте еквивалентне индикаторској снази према топлоти доведеној горивом. Код ото мотора се креће у опсегу од 0.25 до 0.37, док је код дизел мотора у опсегу од 0.38 до 0.50.

Једначина за израчунавање индикаторског степена корисности гласи:

$$\eta_i = 1000 \cdot \frac{w_i \cdot V_{hu}}{G_{cikl} \cdot H_d} \quad [-]$$

Где су:

- w_i - специфични индикаторски рад, kJ/dm^3
- V_{hu} - радна запремина мотора, dm^3
- G_{cikl} - масена циклусна потрошња горива, g/cikl
- H_d - доња топлотна моћ коришћеног горива, kJ/kg

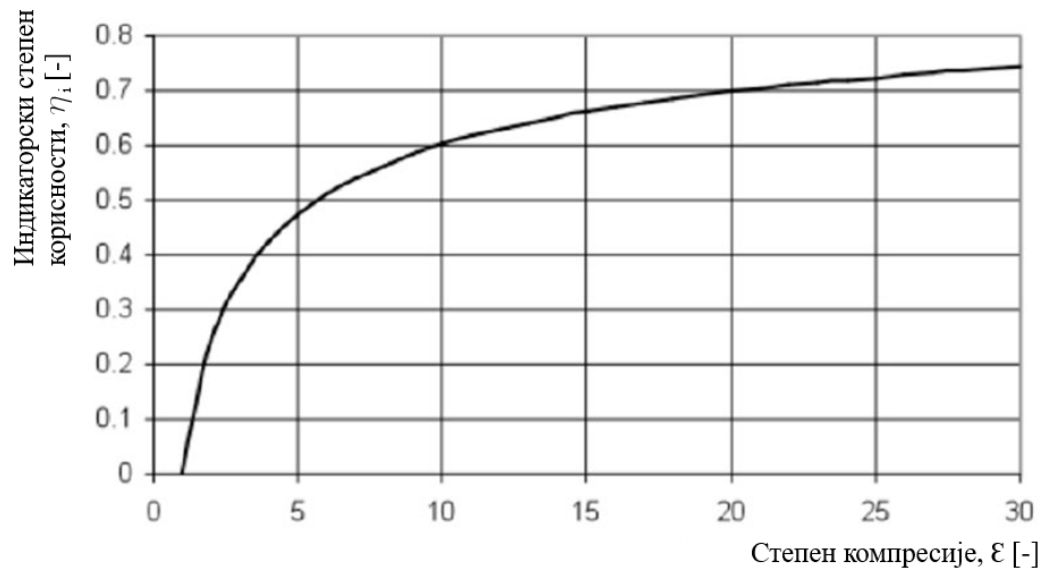
1.4 Утицајни фактори на индикаторски степен корисности мотора СУС

Што се утицајних фактора на индикаторски степен корисности тиче, све зависи од тога да ли се индикаторски степен корисности мери на једном мотору са истим нафтним дериватом под различитим режимима рада, или на једном мотору са различитим нафтним дериватом под истим режимима рада, или пак на различитим моторима. У сваком случају утицајни фактори на индикаторски степен корисности су чиниоци једначине за израчунавање индикаторског степена корисности, односно специфични индикаторски рад, радна запремина мотора, масена циклусна потрошња горива као и доња топлотна моћ горива. Баш због доње топлотне моћи горива, у највећој мери се и разликују индикаторски степен корисности код ото и дизел мотора.

Када се индикаторски степен корисности мери на једном мотору са коришћењем једног нафтног деривата а под различитим режимима рада, на индикаторски степен корисности утичу специфични индикаторски рад и масена циклусна потрошња горива. Ако пак индикаторски степен корисности меримо на истом мотору са коришћењем два нафтна деривата а под истим режимима рада, у том сличају поред специфичног индикаторског рада и масене циклусне потрошње горива утицај на вредност индикаторског степена корисности има и доња топлотна моћ горива.

У овом сличају цео експеримент је вршен на четворотактном дизел мотору, тако да су на вредност индикаторског степена корисности утицале промене специфичног индикаторског рада и масене циклусне потрошње горива.

Међу утицајним факторима, могу се наћи и геометријски параметри, на пример као степен компресије. Дијаграмски приказ утицаја степена компресије на индикаторски степен искоришћења, дат је на слици 3.



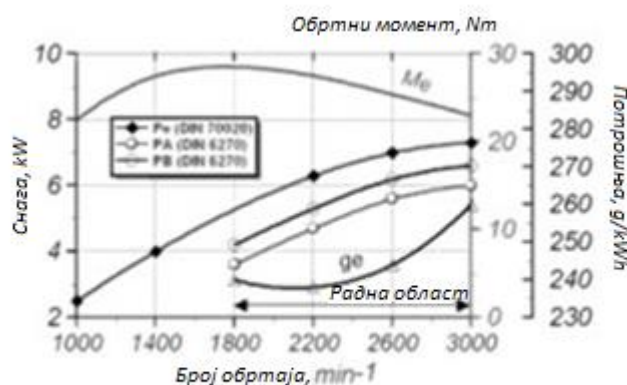
Слика 3. Утицај степена компресије на индикаторски степен корисности [5]

Са слике се може приметити, да индикаторски степен корисности расте са порастом степена компресије.

2. Опис методе и инсталације за експериментално одређивање индикаторског степена корисности мотора СУС

2.1 Опис мерне инсталације

Предмет испитивања је експериментални Дизел мотор, који представља моноцилиндрични мотор DMB 3DA450, произвођача „21. мај – Београд“. Изглед овог мотора као и дијаграм његове декларисане брзинске карактеристике приказани су на слици 4, док су карактеристике и технички подаци базног мотора приказани у табели 1.



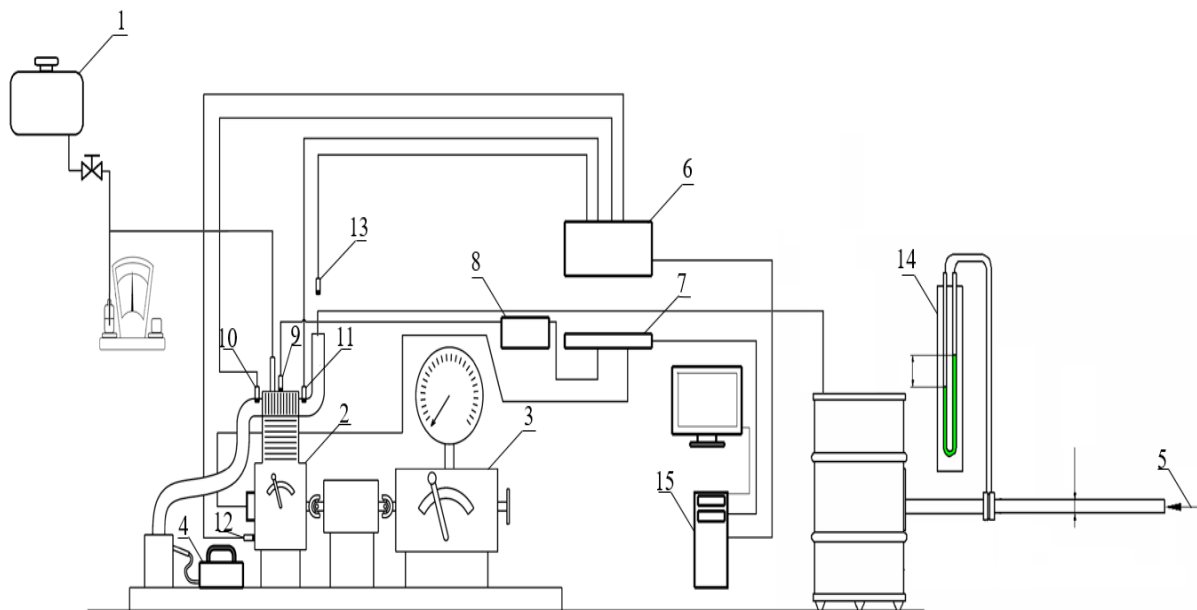
Слика 4. Изглед базног мотора 3DA450 и његове декларисане брзинске карактеристике [6]

Табела 1. Карактеристике и технички подаци базног мотора DMB 3DA450 [6]

Тип /фабр. број	3 DA 450 modul 328 / 2175703
Врста мотора:	-цилиндарски., 4-тактни дизел мотор са директним убризгавањем
Намена мотора:	погон малих пољопривредних и грађевинских машина, електро-генератора
Хлађење	ваздухом, принудно без регулације
Радна запремина	$V_h = 454 \text{ cm}^3$
Пречник / ход клипа	$D / S = 85 / 80 \text{ mm/mm}$
Степен компресије	$\varepsilon = 17,5$
Радна област по броју обртаја	$n = (1800 \div 3000) \text{ o/min}$
Максимална снага мотора ($\pm 5\%$) - према DIN 70020 - према DIN 6270 (блокирана П.В.П.) - према DIN 6270 (блокирана П.В.П.)	$P_e = 7,3 \text{ kW}$ (краткотрајна снага) $P_A = 6,0 \text{ kW}$ (ограничено време рада сходно намени) $P_B = 6,6 \text{ kW}$ (фабричко подешавање)
Максимални обртни момент	$M_{e_{\max}} = 28 \text{ Nm}$ при $n_{M1700} \text{ o/min}$ (одговара кривој снаге P_e)
Специфична ефективна потрошња горива	$g_e = 262 \text{ g/kWh}$ (режим макс. снаге P_B)

Опрема за убризгавање горива: пумпа високог притиска (П.В.П.) - регулатор броја обртаја - угао предубризгавања - брызгач - притисак отварања брызгача	систем пумпа-цев-брызгач моноблок, IPM-YPFR170YS6459/311 свережимски механички $\alpha_{pu}=18,5^\circ KV$ фиксно (фабричко подешавање) затвореног типа, IPM-YKBL78S120/4 $p_{ob} = 125 \text{ bar}$
Разводни механизам: • зазор усисног вентила • зазор издувног вентила • усисни вентил отвара • усисни вентил затвара • издувни вентил отвара • издувни вентил затвара	сабрегастим вратилом у блоку мотора • 0,15 mm • 0,20 mm • $16^\circ KV$ пре SMT • $40^\circ KV$ после UMT • $40^\circ KV$ пре UMT • $16^\circ KV$ после SMT
Електро-опрема мотора алтернатор регулатор пуњења електро-покретач	интегрални, 10-полни, са перманентним магнетом у замајцу стабилилисани усмерач $13,8 \text{ V} / 90 \text{ W} 18 \text{ A}_{MAX}$ BOSCH

На слици 5 приказана је шема мерне инсталације мотора који је уграђен на постоље и прикључен на хидрауличку кочницу за испитивање мотора.



- | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| 1. Резервоар | 2. Мотор | 3. Кочница |
| 4. AVL Ditest | 5. Проток ваздуха | 6. НВМ UPM 60 |
| 7. AVL indimer 619 | 8. Kistler 5007 | 9. Давач притиска |
| 10. Давач температуре у издувном воду | 11. Давач температуре у усисном воду | 12. Давач температуре уља |
| 13. Давач температуре околине | 14. U манометар | 15. Рачунар |

Слика 5. Мерна инсталација [7]

Мотор ради са три горива, референтним горивом са мањим цетанским бројем, испитиваним узорком и референтним горивом са већим цетанским бројем. Гориво се пропушта из резервоара до мотора и мотор се пушта у рад.

- Параметри који се прате током рада мотора су:
- Параметри ефективне снаге мотора (M_e , p_e),
- Потрошња горива,
- Проток ваздуха,
- Карактеристичне температуре: температура ваздуха у уписном воду, температура издувних гасова у издувном воду, температура уља у мотору, температура околине,
- Атмосферски притисак,
- Диференцијални притисак,
- Притисак у цилиндру.

За прикупљање и обраду сигнала задужено је више уређаја који податке даље шаљу у рачунар где се врши додатна обрада података и на крају њихов приказ. Испитивањем се мери број обртаја, обртни момент мотора, количина ваздуха унета у мотор, потрошња горива, потпритисак у уписној грани, састав издувних гасова (CO , HC , O_2) и температура издувних гасова.

2.1.1 Мерење ефективног обртног момента и броја обртаја мотора

Оптерећивање и мерење параметара ефективне снаге мотора је вршено помоћу хидрауличке моторске кочнице SCHENCK U1- 16h, приказане на слици 24. У основи је то двојна регулациона турбо спојница са нагнутим лопатицама. Турбинско коло је блокирано и ослоњено на механичку вагу помоћу које се и мери ефективни обртни момент. Регулациона команда кочнице (пито цев) је опремљена електричним актуатором, тако да је оптерећење мотора задавано даљински.

Калибрација ваге је спроведена помоћу припадајуће опреме, а према упутству произвођача [CARL SCHENCK MASCHINENFABRIK GMBH, Handbuch für hydraulische Leistungsbremse Größe U1-16h, Darmstadt, 1966.]. Њена линеарност је посебно контролисана у опсегу $0 \div 5$ daN, обзиром на перформансе испитиваног мотора.

Број обртаја мотора је мерен дигитално, помоћу система за индицирање AVL Indimer 619, при чему је коришћена средња вредност броја обртаја за 50 узастопних циклуса. Обзиром на методологију мерења калибрација обртомера није предвиђена, а његова провера се врши активирањем подпрограма за контролу синхронизације енкодера.



Слика 6. Моторска кочница SCHENCK U1- 16h

2.1.2 Одређивање индикаторских параметара мотора

$$w_i = 0.1 \cdot p_{mi}, [\text{kJ/dm}^3]$$

$$\xi = \frac{I_{\max} \cdot V_{h1}}{1000 \cdot G_{cicl} \cdot H_d}, [-]$$

$$\eta_i = 1000 \cdot \frac{w_i \cdot V_{hu}}{G_{cicl} \cdot H_d}, [-]$$

$$G_{cicl} = \frac{2 \cdot G_{\min}}{n} \quad [\text{g/cicl}]$$

Где су:

- W_i - специфични индикаторски рад, kJ/dm^3
- p_{mi} - средњи индикаторски притисак, добијен индицирањем, bar
- ξ - Коеф. искоришћења топлоте сагоревања
- $I_{\max}$ - циклусна количина топлоте, kJ/m^3
- V_{h1} - радна запремина цилиндра, dm^3
- V_{hu} - радна запремина мотора у овом случају $V_{hu} = V_{h1}$, dm^3
- G_{cicl} - масена циклусна потрошња горива, g/cicl
- H_d - доња топлотна моћ коришћеног горива, kJ/kg

2.1.3 Мерење потрошње горива

Већ дуги низ година се у Лабораторији за моторе СУС употребљава масена метода мерења потрошње горива. Мерењем масе узорка горива и времена за које се оно утроши одређује се часовна потрошња горива. Коришћена опрема је приказана на слици 7.



Слика 7. Опрема за мерење потрошње горива [6]

На слици су приказани следећи елементи:

1. Електровентил
2. Доводно црево
3. Одводно црево
4. Мерна посуда
5. Прецизна вага
6. Мерни тег
7. Баласт
8. Хронометар

Отварањем електровентила (1) се преко доводног црева (2) врши допуњавање мерне посуде (4). Затварањем вентила мотор троши гориво из мерне посуде (4) преко одводног црева (3).

У припремној фази мерења је потребно да се вага доведе у стање приближне равнотеже избором масе баласта (7). Тада је показивач у мерном пољу скале опсега 100 g и поделом од 1 g. На почетку мерења се стартује хронометар (8) и истовремено региструје положај показивача. Стављањем мерног тега (6) на тас са мерном посудом (4) се дефинише маса узорка горива. Када показивач дође у положај са почетка мерења хронометар се зауставља. Избор масе узорка горива се врши у зависности од радног режима мотора тако да време потрошње није краће од 30 s. Овај метод, ма како изгледао архаично, има низ предности:

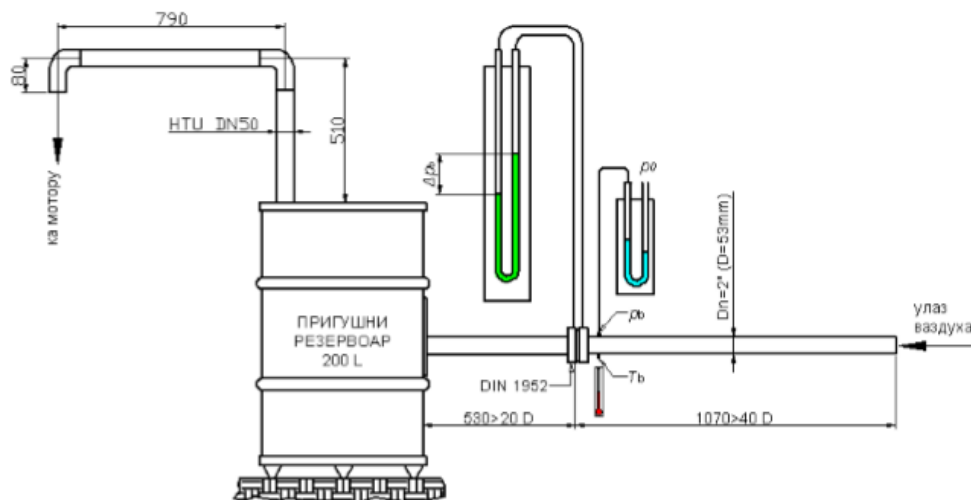
- практично неограничен мерни опсег уз велику прецизност мерења малих потрошњи,
- тачност масе узорка горива је одређена класом тачности мерног тега ($0,1\%$), - не мора се водити рачуна о густини горива као код запреминске методе,
- умањене грешке мерења због хистерезе ваге и промене нивоа горива у мерној посуди,
- простом заменом спремне мерне посуде се прелази на мерење потрошње другог горива.

Главни проблем при оваквом начину одређивања потрошње је субјективне природе, јер испитивач мора бити веома концентрисан и увежбан. Искуство је показало да је тада поновљивост испитивача при одређивању часовне потрошње горива на стабилном радном режиму реда $\pm 1\%$.

2.1.4 Мерење протока ваздуха

На основу познате потрошње ваздуха могуће је израчунавање више радних параметара мотора: запреминског степена пуњења (η_v), просечног коефицијента количине ваздуха смеше (λ), као и специфичне емисије продуката сагоревања. Основни предуслов за прецизно мерење протока помоћу оштрих заслона је устаљеност струјања кроз отвор заслона. Са друге стране, клипни мотор СУС, као циклична машина, генерише изразито нестационарно - импулсно струјање ваздуха у усисном систему, праћено одговарајућим динамичким феноменима. Како уређај за мерење протока ваздуха постаје део усисног система мотора, ови феномени се преносе и на мерни део инсталације. Постављањем пригушног резервоара између мотора и мерног дела инсталације добија се део инсталације велике запремине и проточног пресека, који, у математичком смислу, интегрално импулсну функцију протока генерисану мотором. У идеалном случају би се као резултат добио константан проток на улазу у резервоар, односно кроз мерни део инсталације. Генерално, велики однос запремине пригушног резервоара према циклусној потрошњи ваздуха, као и висока учестаност побуде протока, погодују остварењу овог циља.

На слици 8 је приказан лабораторијски уређај за мерење протока ваздуха која се састоји од усисног цевовода, пригушног резервоара и мерне инсталације.



Слика 8. Скица уређаја за мерење протока ваздуха [6]

За израчунавање запреминског и масеног протока ваздуха, коришћене су следеће релације:

$$Q_v = K_b \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_b}{\rho}}, [\text{L/min}]$$

$$Q_m = K_b \cdot \sqrt{\rho \cdot \Delta p_b}, [\text{g/min}]$$

Коефицијенти бленди израчунавају се на следећи начин:

$$K_{b10} = 13,426 - 0,0007 \cdot \Delta p_b$$

$$K_{b15} = 30,602 - 0,0039 \cdot \Delta p_b$$

$$K_{b20} = 53,840 - 0,0068 \cdot \Delta p_b$$

$$K_{b25} = 84,229 - 0,09 \cdot \Delta p_b$$

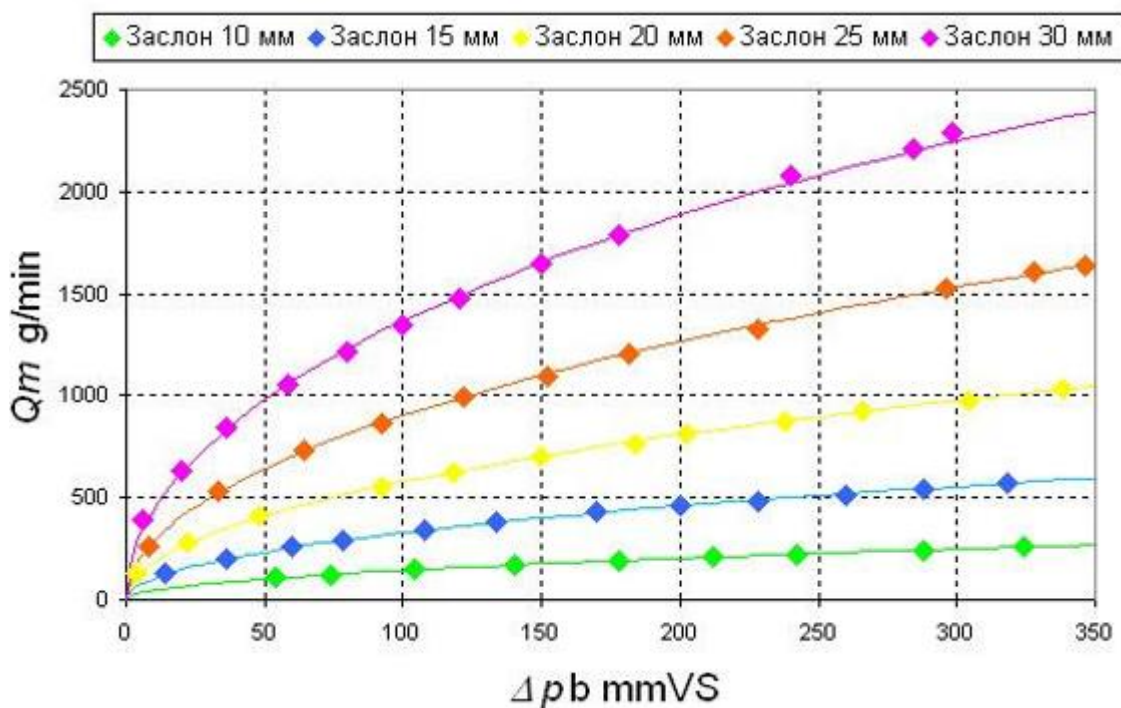
$$K_{b30} = 128,83 - 0,0262 \cdot \Delta p_b$$

Наведене релације за коефицијенте бленде важе за следеће услове:

$$30 \leq \Delta p_b \leq 450 \text{ mmVS}$$

Температура воде у манометру $20^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$

Промена масеног протока рачуната у зависности од пада притиска на заслону, а према датим једначинама, приказана је сликом 9.



Слика 9. Калибрационе криве уређаја за мерење протока ваздуха [6]

2.1.5 Мерење карактеристичних температура

За мерење температура су као давачи коришћени термопарови Ni-CrNi (тип "К"), пре свега због њихове робусности и ширине мерног опсега. Мерене су температуре:

- Издувних гасова t_{ig} ($150 \div 750$) °C,
- Цилиндарске главе t_{cg} ($80 \div 200$) °C,
- Уља у картеру t_u ($60 \div 110$) °C,
- Ваздуха у уписном воду t_{uv} ($20 \div 50$) °C,
- Ваздуха испред заслона (бленде) за мерење протока ваздуха t_b ($15 \div 35$) °C.

Мерни ланац је оформљен применом мерног систем HBM UPM 60. Он је опремљен десетоканалним модулом за подршку термопарова UMH 3205, прикључним панелом VT 21 са компензатором температуре прикључака VMA 3205 (слика 10) "Хладни крај" термопарова је електронски симулиран у самом модулу, док је калибрациона крива свих стандардних термопарова фабрички унешена. Обзиром да су мерења температура углавном упоредног и контролног карактера, њихова тачност није пресудна. Стога није вршена калибрација мерила температуре преко целог мерног опсега већ су изведена контролна мерења у две тачке. За референтне температуре су изабране: температура топљења леда t_{ref1} и температура кључања воде t_{ref2} . Контрола је вршена баждареним живиним "хемијским" термометром опсега ($0 \div 100$) °C, са поделом $1/10$ °C, гарантоване тачности $\pm 0,15$ °C на t_{ref1} , односно $\pm 0,25$ °C на t_{ref2} .



Слика 10. Опрема за мерење температура [6]

2.1.6 Мерење атмосферског притиска

Атмосферски притисак је мере анеоридним, температурски компензованим барометром *Brüel&Kjær* тип U0003. Инструмент је калибрисан на собној температури при притиску 997 mbar. Као калибрациони барометар је коришћен лабораторијски живин барометар (Торичелијева цев). Очитавање вредности атмосферског притиска је вршено на почетку и крају сваке серије испитивања, док је у случају појаве евентуалне разлике за прорачуне коришћена средња вредност.



Слика 11. Барометар *Brüel&Kjær* U0003 [6]

2.1.7 Мерење диференцијалног притиска

Ова величина је мерена ради одређивања протока ваздуха. Помоћу воденог диференцијалног манометра (слика 12). Метални лењир за мерење висине воденог стуба одговара стандарду ГОСТ 427-75 и има поделу 1mm.

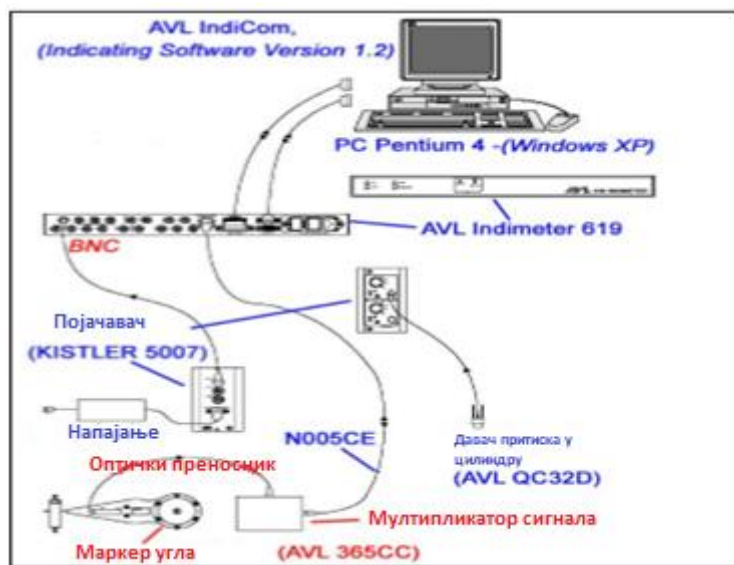


Слика 12. Мерило диференцијалног притиска [6]

2.1.8 Мерење притиска у цилиндру мотора – индицирање

Мерни ланац за индицирање цилиндарског притиска је остварен применом савременог мерног система AVL Indimer 619, који је приказан на слици 13. Он се условно може поделити на четири целине:

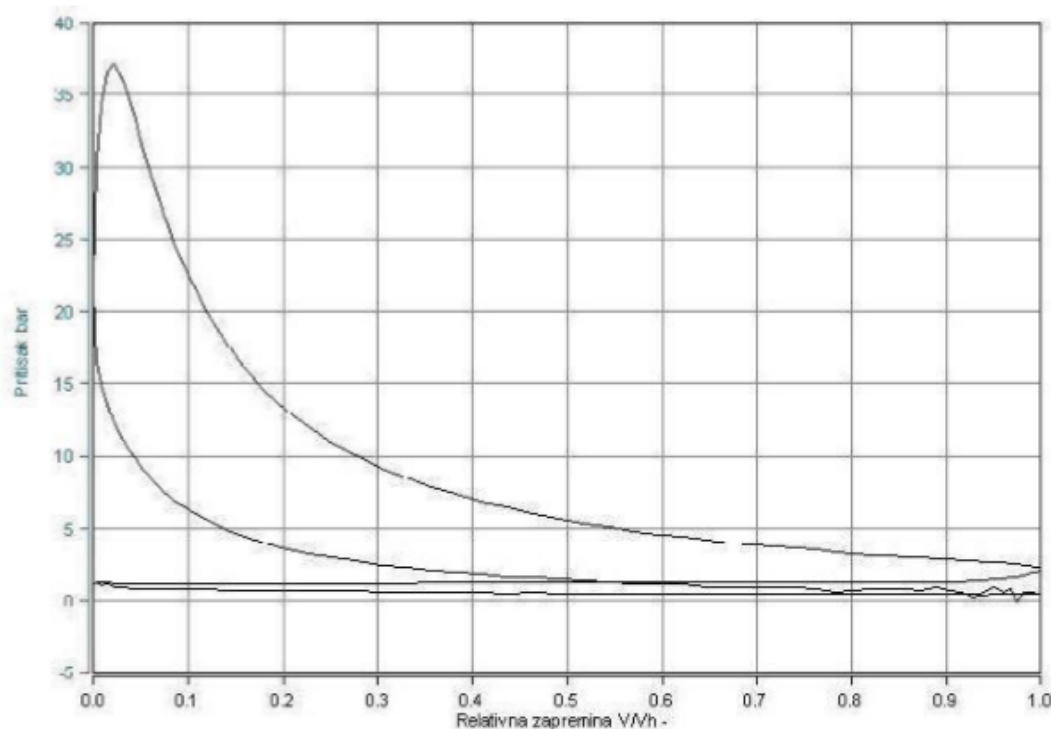
- Аналогни део који чине пиезодавач притиска AVL QC32D и појачавач за кондиционирање сигнала притиска KISTLER 5007,
- Дигитални део за управљање A/D конверзијом кога чине: оптички маркер угла KB и положаја CMT (encoder) AVL 365CC, оптички преносник AVL 365.00 & 365.001 и мултипликатор импулса AVL 365Z01M. Могуће резолуције аквизиције су (36, 60, 90, 180, 360, 720, 900 и 1800) imp./obrt. Коришћено је 720 imp./obrt.
- Процесор сигнала у реалном времену са 8-каналним A/D конвертором (AVL Indimeter 619)
- Персонални рачунар Pentium 4 са софтверском подршком система AVL IndiCom 1.2



Слика 13. Мерни систем за индицирање цилиндарског притиска [6]

Поред основне функције аквизиције сигнала у домену угла коленастог вратила овај систем омогућава и:

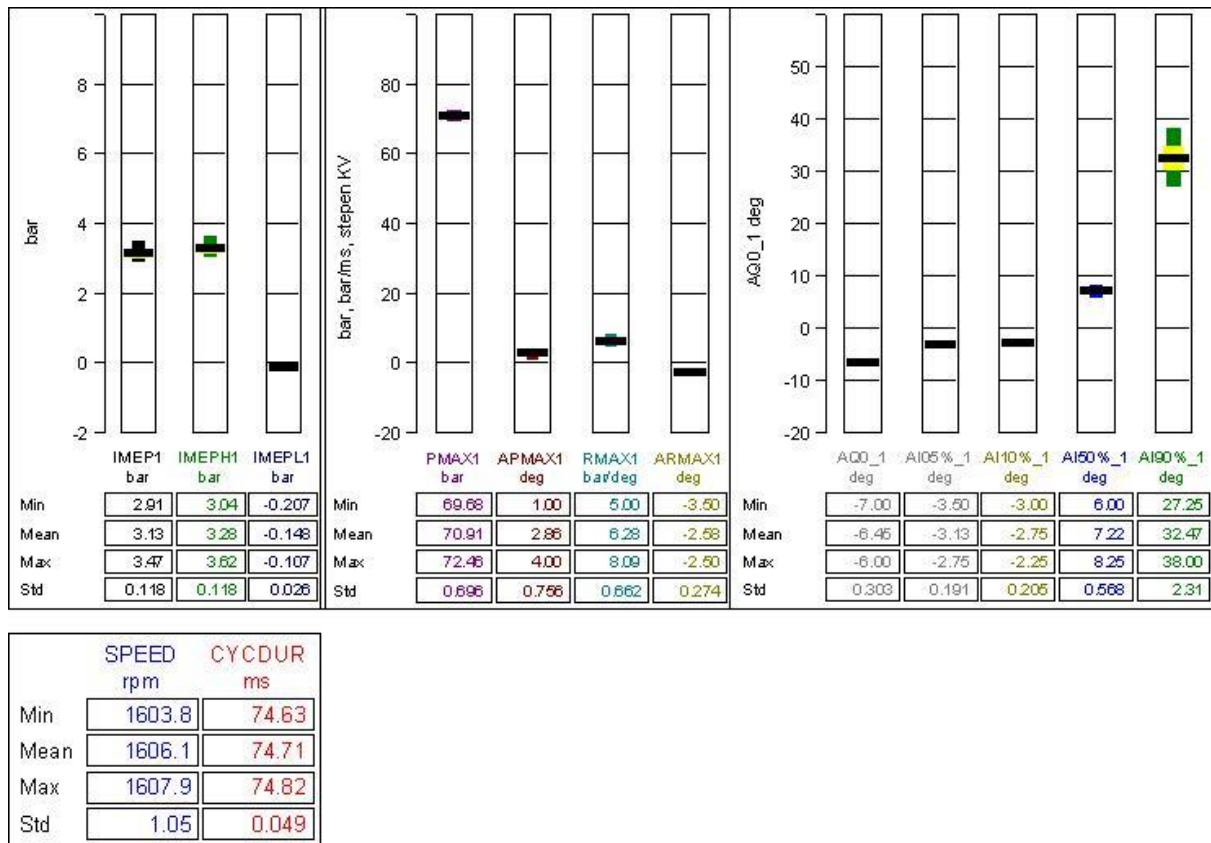
I Осцилоскопски мод рада и мониторинг улазних сигнала или било ког сигнала добијеног њиховом обрадом у реалном времену (слика 14):



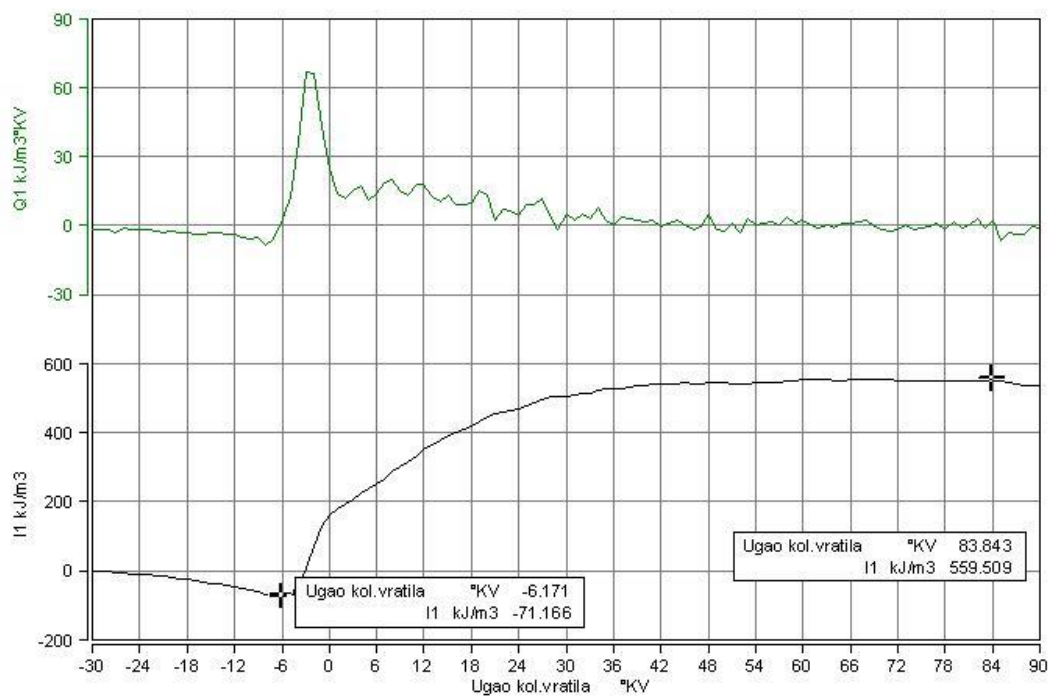
Слика 14. Приказ затвореног индикаторског дијаграма на једном од режима [6]

Мерење, типске прорачуне и приказ великог броја индикаторских параметара за практично произвољан низ узастопних циклуса:

- максимални притисак циклуса P_{MAX1} ,
- положај максималног притиска циклуса AP_{MAX1} ,
- максималну брзину пораста притиска R_{MAX1} ,
- положај максималне брзине пораста притиска AR_{MAX1} ,
- средњи индикаторски притисак циклуса $IMEP1$
- средњи индикаторски притисак високопритисног дела циклуса $IMEPH1$
- средњи индикаторски притисак нископритисног дела циклуса $IMEPL1$
- положај почетка сагоревања (само код дизел мотора) $AQ0_1$
- дискретне положаје сагоревања 5%, 10%, 50%, и 90% циклусне количине горива, $AQ05_1$, $AQ10_1$, $AQ50_1$, $AQ90_1$
- време трајања циклуса $CYCDUR$, односно број обртаја $SPEED$
- статистичку анализу свих горе наведених параметера за избрани број узастопних циклуса у случају нормалне расподеле: минимална вредност параметра Min , средња вредност параметра $Mean$, максимална вредност параметра Max и стандардна девијација параметра Std . (слика 15.)

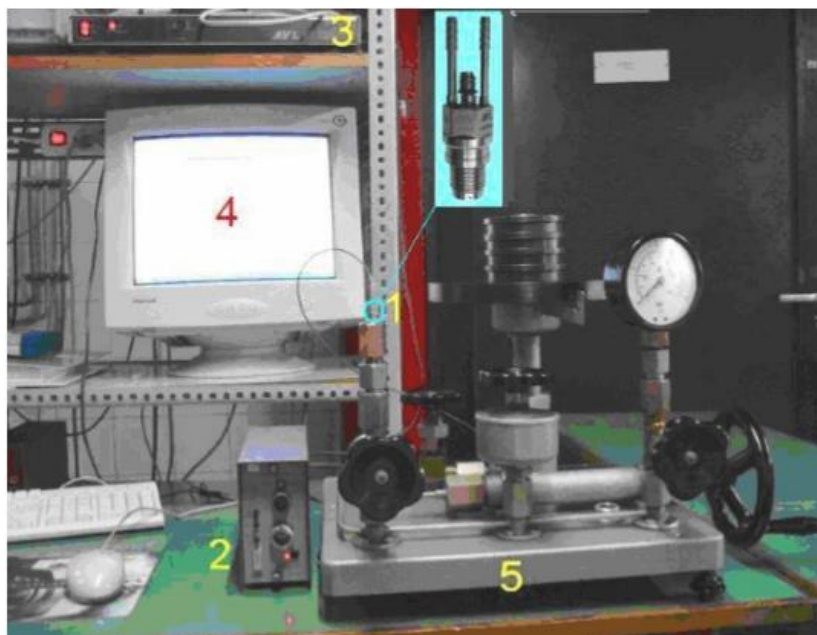


Слика 15. Приказ изабраних индикаторских параметара [6]



Слика 16. Приказ диференцијалног и интегралног облика закона сагоревања [6]

- Флексибилну обраду података на бази прорачуна дефинисаног од стране корисника, као и кориснички дефинисану презентацију резултата,
- Одређивање механичке грешке постављања маркера положаја СМТ термодинамичком методом,
- Калибрацију целокупног мерног ланца за мерење цилиндарског притиска динамичком методом, што је приказано на слици 17.

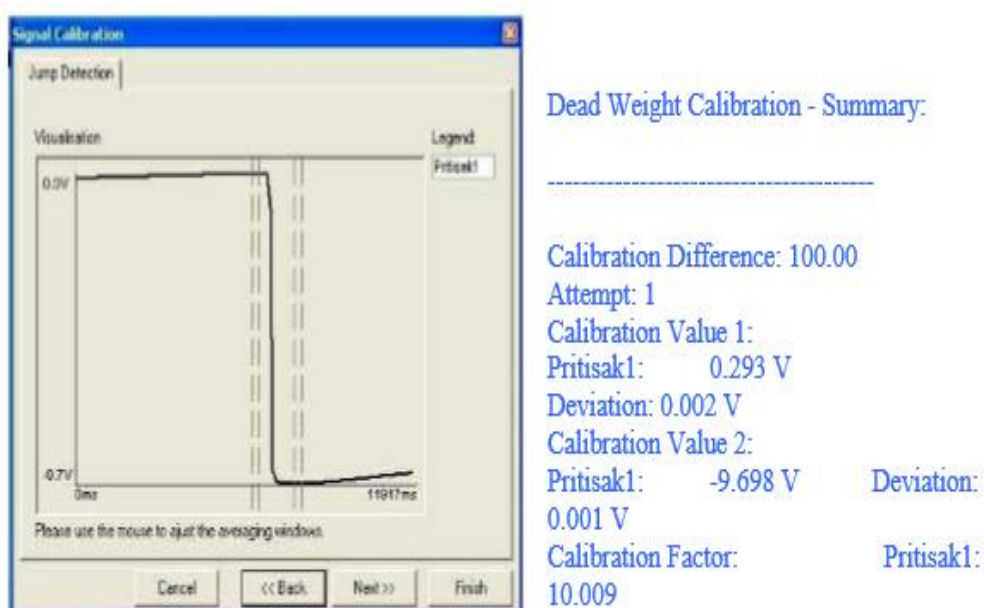


Слика 17. Мерни ланац за индицирање притиска у цилиндру током калибрације [6]

На слици су приказани следећи елементи:

1. Пиезо-давач притиска AVL QC 32D
2. Пиезо појачавач KISTLER 5007
3. Мерни систем AVL Indimer 619
4. PC + софтвер AVL IndiCom 1.2
5. Калибратор притиска до 500 bar VEB Meßgerätewerk DDR

Обзиром да пиезо давачи региструју релативну промену притиска, калибрација је извршена његовом скоковитом променом. Најпре је у инсталацији индукован притисак од 100 bar, извршено је ресетовање појачавача и покренут програм калибрације. Наглим отварањем растеретног вентила је извршена скоковита, прецизно дефинисана промена притиска, како је приказано на слици 18. Финим подешавањем појачања, постављен је фактор размере од 10 bar/1V.

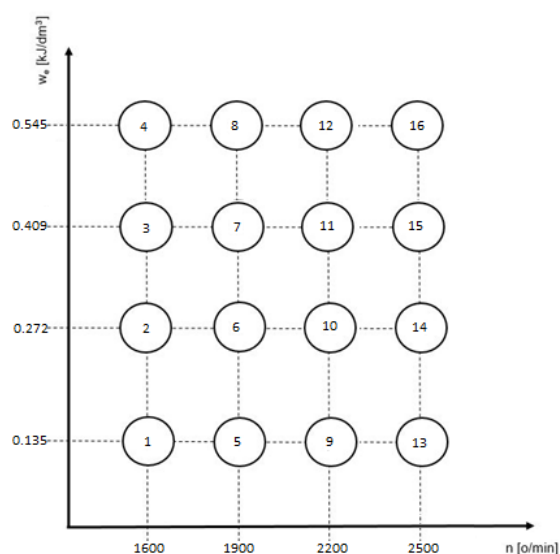


Слика 18. Дијаграмски приказ промене притиска и извештај о калибрацији мерног ланца [6]

2.2 Методологија испитивања

2.2.1 Избор радних режима

Током извођења експеримента, мерења су организована тако да се добије довољан број параметара за одређивање ефективних показатеља мотора. На слици 19 се може видети да на сваком од радних режима је помоћу појединачних мерила или мерних ланаца регистровано укупно 16 резултата мерења. Тачније речено, као променљиве за успостављање режима, изабрани су број обртаја и оптерећење, и то по 4 вредности за сваку.



Слика 19. Режији рада испитиваног мотора СУС

Приликом мерења, прво је успостављен унапред дефинисан режим. Након постизања одговарајућег броја обртаја и оптерећења, пре самог мерења, сачекано је одређено време, како би се мотор стабилизовао на датом режиму. Након стабилизације мотора, започето је мерење, где су добијени индикаторски показатељи мотора, заправо осредњене вредности за 50 узастопних циклуса.

Предност примене више режима испитивања омогућава касније утврђивање тренда промене индикаторског степена корисности.

3. Експериментално одређивање индикаторског степена корисности мотора СУС на четворотактном дизел мотору (резултати и дискусија)

3.1 Резултати експеримента

Мерен је ефективни индикаторски параметар мотора за четири броја обртаја и четири оптерећења, односно укупно 16 режима мерења. Први број обртаја је $n_1 = 1600$, **o/min**, други $n_2 = 1900$, **o/min**, трећи $n_3 = 2200$, **o/min** и четврти $n_4 = 2500$ **o/min**, док су оптерећења тј. ефективни радови $w_{e1} = 0.135$ [kJ/dm³], $w_{e2} = 0.272$ [kJ/dm³], $w_{e3} = 0.409$ [kJ/dm³] и $w_{e4} = 0.545$ [kJ/dm³].

Добијени резултати са мерења су помоћу програма Microsoft Office Excel обрађени ради добијања жељених података (слика 20).

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC
1	EKO3/DZEL			K blende	10mm	13,426-0,0007*Δpb																						
2	14.7			K blende	15mm	30,602-0,0039*Δpb																						
3	42850			K blende	20mm	53,840-0,0068*Δpb																						
4	17.5			K blende	25mm	84,229-0,009*Δpb																						
5	0.454			K blende	30mm	128,83-0,0262*Δpb																						
6	14																											
7																												
8																												
9	R. br.	n o/min	pmi bar	lmax kJ/m3	F daN	mg g	tg s	tubr ms	upp (apu) s	Δpb mmVS	Kblende	-pus mbar	L %	λ	CO %	CO2 %	O2 %	HC ppm	NOx ppm	BSN	Tig °C	Tcg °C	Tulja °C	Tus °C	To °C	Po mbar	ψ %	
10	1	996.8	2.25	411.03	0.03	10	187.2			12	53.7252										118.8	63.6	40	26.7	25.1	988	70	
11	2	1606.1	3.13	630.5	0.67	10	96.6			36	53.4912										157	74	50.3	27.2	25.4	988	70	
12	3	1606.2	4.49	829.44	1.4	10	71.6			37	53.5002										204	84.5	56.6	28	25.8	988	70	
13	4	1603.1	6.12	1170.46	2.15	10	58.3			37	53.5002										216	92.8	60	28.4	25.9	988	70	
14	5	1605.8	7.42	1386.4	2.8	20	84.5			36	53.5092										321	107	66.8	29	26.3	988	70	
15	6	1907.8	3.04	702.4	0.7	10	74.7			54	53.3472										169.8	78	64.7	28.5	25.7	988	70	
16	7	1902.2	4.47	917.1	1.4	10	57.6			54	53.3472										218.8	87	68.5	28.9	26.3	988	70	
17	8	1899.4	5.98	1138	2.1	10	44.6			51	53.3742										276.8	99	72.6	29.6	26.5	988	70	
18	9	1905.7	7.54	1484.62	2.8	10	34.5			50	53.3832										342	109.5	75.8	30.2	26.7	988	70	
19	10	2203.7	3.12	714.71	0.73	10	70			62	53.2752										199	90	77	30.5	27	988	70	
20	11	2197.3	4.67	947.8	1.4	10	48.9			62	53.2752										318	103.6	81	30.9	27	988	70	
21	12	2195.6	6.23	1251.5	2.1	10	36.3			62	53.2752										325	103	86	30	27	988	70	
22	13	2196.7	7.75	1509.12	2.8	10	28.2			60	53.2932										343	110	76	30.5	27.4	988	70	
23	14	2515.3	3.02	668.6	0.7	10	59.1			74	53.1672										215	91	84.8	30.7	27.5	988	70	
24	15	2501.8	4.6	960.09	1.4	10	42			76	53.1492										270.3	93.2	85	30.5	27.5	988	70	
25	16	2511.8	6.05	1251.5	2.1	10	33.8			76	53.1492										341.5	103.7	86.7	30.6	27.4	988	70	
26	17	2504.2	7.58	1552.1	2.8	20	49.5			72	53.1852										351.7	119.8	90	31.2	27.6	988	70	
27																												
28																												
29		Pe kW	Kfakt	Pek kW	Gh kg/h	ge g/kWh	mgc g/cikl	w _e kJ/dm ³	W _i kJ/dm ³	Pi kW	η _m	η _i	η _e	Q _v l/min	Q _m g/min	mvc g/ciklus	mvo g/ciklu	λ _f	η _v	ρ								
30	1	0.022	1.035	0.023	0.192	8737.5	0.00643	0.006	0.225	0.849	0.026	0.371	0.010	173.23	199.95	0.40	0.09	4.244	0.766	1.154								
31	2	0.792	1.035	0.820	0.373	470.5	0.00773	0.130	0.313	1.902	0.416	0.429	0.179	307.07	354.09	0.44	0.11	3.878	0.842	1.153								
32	3	1.655	1.036	1.714	0.503	303.8	0.01043	0.272	0.449	2.728	0.607	0.456	0.277	303.26	349.22	0.43	0.15	2.835	0.832	1.152								
33	4	2.537	1.036	2.628	0.617	243.4	0.01284	0.418	0.612	3.712	0.683	0.505	0.345	303.31	349.17	0.44	0.19	2.308	0.833	1.151								
34	5	3.309	1.037	3.431	0.852	257.5	0.01769	0.545	0.742	4.508	0.734	0.444	0.326	299.43	344.24	0.43	0.26	1.649	0.821	1.150								
35	6	0.983	1.036	1.018	0.482	490.3	0.00842	0.136	0.304	2.194	0.448	0.383	0.171	365.25	420.75	0.44	0.12	3.564	0.843	1.152								
36	7	1.960	1.037	2.032	0.625	318.9	0.01095	0.272	0.447	3.217	0.609	0.432	0.263	365.61	420.33	0.44	0.16	2.745	0.847	1.150								
37	8	2.936	1.037	3.045	0.807	275.0	0.01417	0.409	0.598	4.297	0.683	0.447	0.306	355.61	408.56	0.43	0.21	2.066	0.825	1.149								
38	9	3.927	1.037	4.074	1.043	265.7	0.01825	0.545	0.754	5.436	0.722	0.438	0.316	352.29	404.47	0.42	0.27	1.582	0.814	1.148								
39	10	1.184	1.038	1.229	0.514	434.4	0.00778	0.142	0.312	2.601	0.455	0.425	0.193	391.69	449.26	0.41	0.11	3.566	0.783	1.147								
40	11	2.264	1.038	2.350	0.736	325.2	0.01117	0.272	0.467	3.882	0.583	0.443	0.258	391.69	449.26	0.41	0.16	2.491	0.785	1.147								
41	12	3.394	1.039	3.525	0.992	292.2	0.01506	0.409	0.623	5.175	0.656	0.438	0.287	391.95	448.96	0.41	0.22	1.848	0.786	1.145								
42	13	4.527	1.039	4.703	1.277	282.0	0.01937	0.545	0.775	6.441	0.703	0.424	0.298	385.77	441.74	0.40	0.28	1.412	0.774	1.145								
43	14	1.296	1.039	1.346	0.609	470.1	0.00807	0.136	0.302	2.874	0.451	0.396	0.179	427.41	489.41	0.39	0.12	3.279	0.749	1.145								
44	15	2.578	1.039	2.678	0.857	332.5	0.01142	0.272	0.460	4.354	0.592	0.427	0.253	432.93	495.90	0.40	0.17	2.361	0.762	1.145								
45	16	3.882	1.039	4.034	1.065	274.3	0.01413	0.409	0.605	5.749	0.675	0.454	0.306	433.07	495.73	0.39	0.21	1.900	0.760	1.145								
46	17	5.161	0.990	5.110	1.455	281.9	0.01936	0.545	0.758	7.181	0.719	0.415	0.298	401.98	506.68	0.40	0.28	1.422	0.707	1.260								

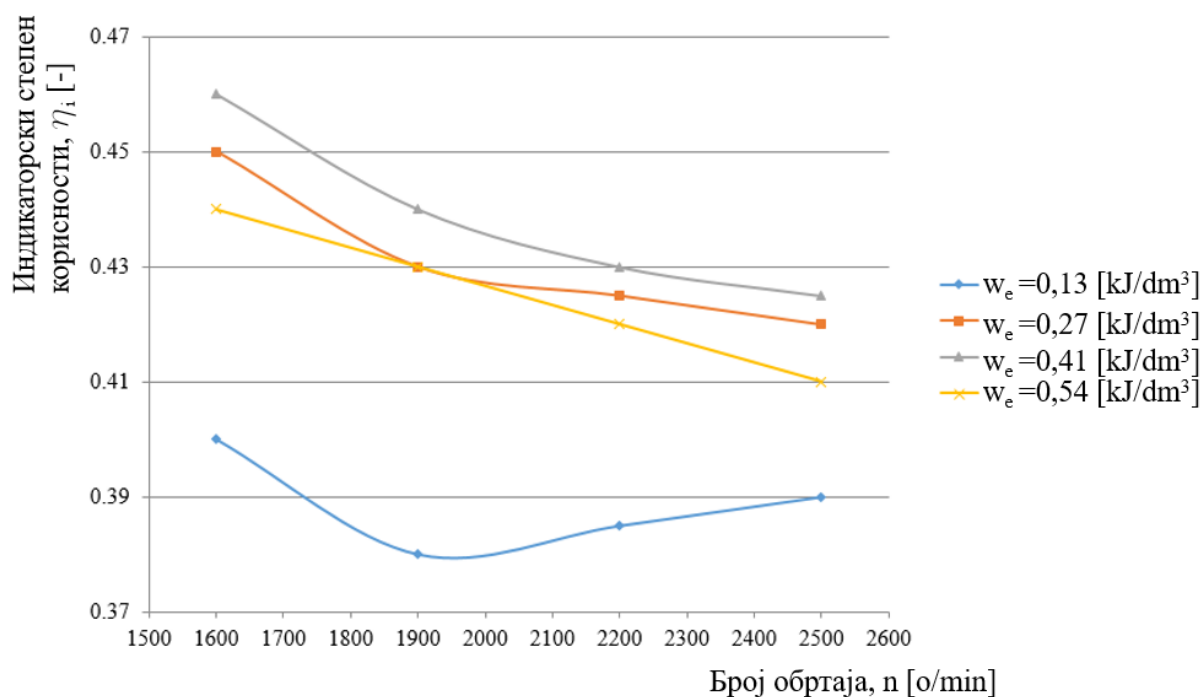
Слика 20. Табела са резултатима добијених експериментом

3.2 Дискусија експеримента

3.2.1 Утицај броја обртаја мотора на индикаторски степен корисности

Табела 2. Вредности индикаторског степена корисности за различите вредности оптерећења и бројева обртаја

w_e/n	$n_1=1600$ o/min	$n_2=1900$ o/min	$n_3=2200$ o/min	$n_4=2500$ o/min
$w_{e1} = 0.135$ [kJ/dm ³]	0.4	0.45	0.46	0.44
$w_{e2} = 0.272$ [kJ/dm ³]	0.38	0.43	0.44	0.43
$w_{e3} = 0.409$ [kJ/dm ³]	0.385	0.425	0.43	0.42
$w_{e4} = 0.545$ [kJ/dm ³]	0.39	0.42	0.425	0.41



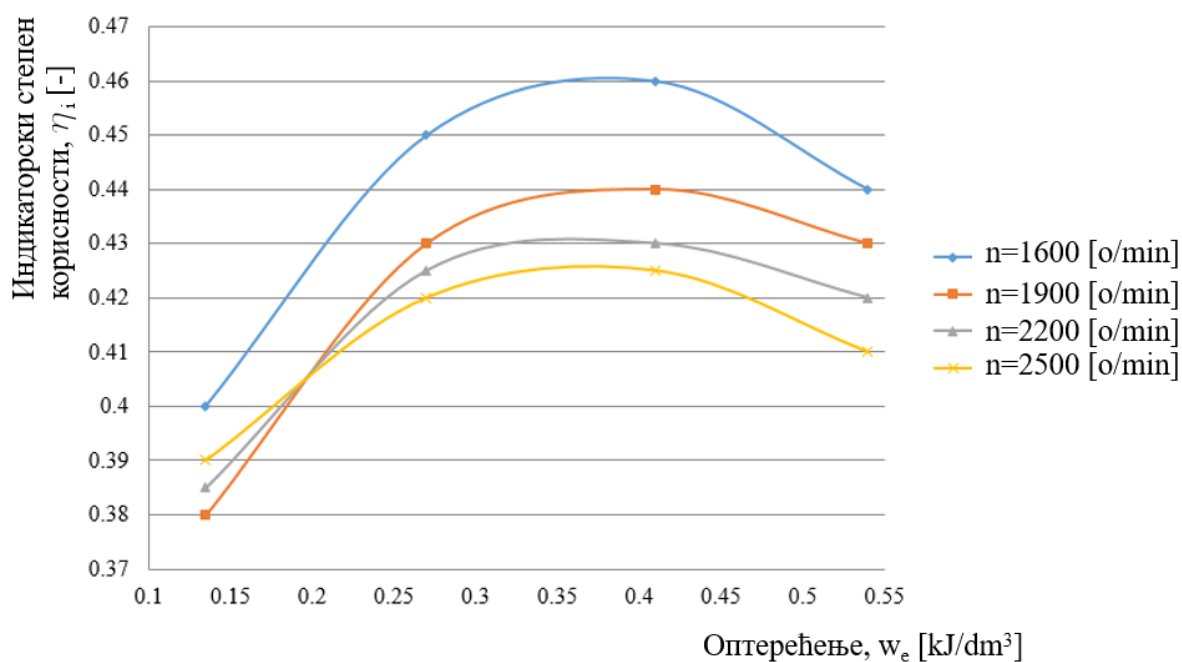
Слика 21. Зависност индикаторског степена корисности од броја обртаја за различита оптерећења

Анализирајући дијаграм дат на слици 21, може се рећи да за дата оптерећења индикаторски степен корисности у функцији од броја обртаја има тенденцију да опада. На нижим бројевима обртаја индикаторски степен корисности је велики, а са порастом оптерећења почиње да опада његова вредност. Тако се понаша на вишим оптерећењем, док је за најниже оптерећење индикаторски степен корисности непредвидив, зато што након одређеног броја обртаја почиње да расте.

3.2.2 Утицај оптерећења мотора на индикаторски степен корисности

Табела 3. Вредности индикаторског степена корисности за различите вредности оптерећења и бројева обртаја

w_e / n	$n_1=1600$ o/min	$n_2=1900$ o/min	$n_3=2200$ o/min	$n_4=2500$ o/min
$w_{e1} = 0.135$ [kJ/dm ³]	0.4	0.45	0.46	0.44
$w_{e2} = 0.272$ [kJ/dm ³]	0.38	0.43	0.44	0.43
$w_{e3} = 0.409$ [kJ/dm ³]	0.385	0.425	0.43	0.42
$w_{e4} = 0.545$ [kJ/dm ³]	0.39	0.42	0.425	0.41



Слика 22. Зависност индикаторског степена корисности од оптерећења за различите бројеве обртаја

Анализирајући дијаграм са слике 22, може се приметити да за различите бројеве обртаја индикаторски степен корисности у функцији од оптерећења има тенденцију да расте. Тако се понаша при сваком броју обртаја, али након одређене вредности оптерећења почиње да опада вредност индикаторског степена корисност.

Добијени резултати експерименталног истраживања, приказани сликама 21 и 22 се могу сматрати коректним. Тачније тренд промене индикаторског степена корисности је веома сличан литературним подацима [8].

4. Закључак

Мотори СУС су незаменљиви погонски агрегати готово свих мобилних система. Ефикасност мотора СУС представља битан параметар у процесу експлоатације.

У склопу завршног рада, спроведено је експериментално одређивање индикаторског степена корисности. Током експеримента извршено је мерење већег броја параметара. У току експеримента закључено је да извођење експеримента није ни мало једноставно. Такође за успешно извођење експеримента потребно је више чланова, и да сви чланови тима буду сложни и добро увежбани за рад са мерном опремом, како би се смањила могућност појаве грешке при мерењу.

Међутим, људски фактор је увек присутан, па се грешке често дешавају. Ипак грешке се налазе у опсегу дозвољених граница толеранције.

Добијене вредности индикаторског степена корисности посматране су у функцији броја обртаја за различита оптерећења, као и у функцији оптерећења за различите бројеве обртаја. Анализом резултата добијене су реалне вредности индикаторског степена корисности. Такође тренд промене одговара литеретурним подацима, те се истраживање може сматрати успешним.

Литература

- [1] Миљин Н. Истраживање оптималног управљања системом паљења ОТО-мотора применом вештачких неуронских мрежа, Докторска дисертација, Машински факултет, Београд, 2012.
- [2] Дорић, Ј. Унапређење ефективности мотора СУС применом неконвенционалног клипног механизма, Докторска дисертација, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2013.
- [3] CIAK-AUTO, интернет адреса: <https://ciak-auto.hr/novosti/princip-rada-dizel-motora/>, приступљено 18.09.2019.
- [4] MOTORI SUS, интернет адреса: https://izmotorasus.weebly.com/sistem_ubrizgavanja_dizel_motora.html, приступљено 19.09.2019.
- [5] Hardwarzone, интернет адреса: <https://www.hardwarezone.com.sg/feature-why-you-should-consider-diesel-your-next-car/diesel-vs-petrol-engines>, приступљено 28.09.2019.
- [6] Давинић А.: „Идентификација карактеристика мултипроцесног рада клипног мотора СУС“, Докторска дисертација, Крагујевац, 2013.
- [7] Грујић, И., Давинић, А., Стојановић, Н., Глишовић, Ј., Милорадовић, Д.: Determination of influence parameters on concentration of carbonmonoxide in exhaust gases by using artificial neural networks (ANN), Tractors and power machines, Vol. 22, No. 1/2, pp. 58-65, ISSN 0354-94966, 2017.
- [8] S. Nallusamy, S. Sendilvelan, K. Bahaskar, M. N. Prabu, Analysis of performance, combustion and emission characteristics on biofuel of novel pine oil, Rasayan Journal of Chemistry, 2017.