

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Аутомобилско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Аутомобилско инжењерство

Предмет: Моделирање процеса у моторима СУС

Број индекса: 340/2013

Иван Љ. Грујић

**Експериментално одређивање параметара
двостепене Vibe функције код дизел мотора
мастер рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. др Александар Давинић, доц. - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да обради тему према следећим тезама:

- Значај и врсте Vibe функције у термодинамичким прорачунима мотора СУС
- Теоријске основе одређивања параметара двостепене Vibe-функције на основу експерименталних података,
- Експериментално одређивање и анализа утицаја радног режима дизел мотора на параметре двостепене Vibe функције.
- Закључна разматрања.

Препоручена литература:

[1] Д. Радоњић, Р. Пешић: Топлотни прорачун мотора СУС , Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 1996.

[2] Radivoje B. PEŠIĆ, Aleksandar Lj. DAVINIĆ, Dragan S. TARANOVIĆ, Danijela M. MIŁORADOVIĆ, Snežana D. PETKOVIĆ, **Experimental determination of double vibe function parameters in diesel engines with biodiesel**, Thermal Science, ISSN 0354-9836, vol. 14 (2010), No. Suppl., pp. 207-218, DOI:10.2298/TSCI100505069P.

[3] Упутство за руковање мерним системом «AVL-Indimer 619»

Крагујевац, 9 март 2015.

ментор

Др Александар Давинић, доцент

Резиме

У овом раду је објашњена методологија одређивања параметара двостепене Vibe функције на основу експерименталних података. Аутор функције је Иван Иванович Виебе (1902-1969). На почетку рада наведено је зашто се користе математичке методе при прорачуну мотора са унутрашњим сагоревањем. Након тога речено је нешто о врстама и примени Vibe функција. Објашњено је како се одређују параметри Vibe функције, на основу експерименталних података. Описана је мерна инсталација за мерење појединих величина као и начин њиховог мерења. Описано је добијање података експериментом. На самом крају извршена је анализа утицаја радних режима на параметре двостепене Vibe функције.

Кључне речи: *мотор са унутрашњим сагоревањем, Vibe функција, параметри Vibe функције, експеримент, утицај радних режима.*

Summary

In this paper is explained the methodology for determining the parameters of double Vibe function on the basis of experimental data. Author of function is Иван Иванович Виебе (1902-1969). At the beginning of the paper is explained why are used a mathematical methods in calculations of internal combustion engine After that something was said about the types and application of Vibe functions. It is explained how to determine the parameters of the Vibe functions, on the basis of experimental data. Is described the measuring installation for the measurement of individual sizes, and way to measuring them. Is described how the data was obtained by experiment. At the end is performed the analysis of the influence of working regimes on the parameters of double Vibe function.

Key words: *internal combustion engine, the Vibe function, parameters of the Vibe function, the experiment, the influence of working regimes.*

Садржај

1 Увод.....	6
1.1 Значај и врсте Vibe-функције у термодинамичким прорачунима мотора СУС.....	9
1.2 Теоријске основе одређивања параметара двостепене Vibe-функције на основу експерименталних података.....	15
2 Експериментално истраживање.....	24
2.1 Опис мерне инструментације.....	24
2.1.1 Мерење ефективног обртног момента и броја обртаја мотора	24
2.1.2 Мерење протока ваздуха.....	25
2.1.3 Мерење потрошње горива	27
2.1.4 Мерење температура	28
2.1.5 Мерење притисака	29
2.1.6 Мерење притиска у цилиндру мотора – индицирање	30
3 Опис и резултати експеримента	34
3.1 Протокол испитивања.....	36
4 Утицај радних режима дизел мотора на параметре двостепене Vibe функције	40
4.1 Параметар облика првог дела Vibe функције.....	40
4.2 Параметар облика другог дела Vibe функције	43
4.3 Однос углова трајања првог и другог дела Vibe функције	45
4.4 Удео сагорелог горива током првог дела Vibe функције	47
Закључак	50
Литература.....	52

1 Увод

Током похађања курса моделирања процеса у моторима СУС, добили смо задатак да извршимо калибрацију параметара топлотног прорачуна, на номиналном режиму дизел мотора, а на основу експериментално добијених вредности. Процес сагоревања смо описивали једностепеном Vibe функцијом, и варирали смо параметар облика m_1 , да би карактеристике тока притиска одговарале измереним. Постојале су потешкоће, из тог разлога што је коришћена једностепена Vibe функција. Због свега наведеног јавила се потреба прорачуна параметара двостепене Vibe функције.

При проучавању процеса сагоревања, као и одређивања параметара мотора СУС, експеримент представља незаменљив део процеса истраживања. Међутим, извођење експеримента захтева опрему и време. Тачније речено, извођење експеримента може бити веома скупо и дуготрајно. Мада, данас наука и техника су доста напредовале, па тако да ће се приступити математичким методама, на основу којих се описује процес сагоревања у мотору СУС, као и одређивање параметара сагоревања. Под математичким методама се подразумевају једначине, које су добијене на основу раније извођених експеримената, и у довољној мери су тачне и могу да опишу процесе у моторима.

Сама употреба математичких једначина омогућује следеће предности:

- бржи пут до резултата и
- нижу цену коштања.

Наравно, треба напоменути да се математичке једначине не решавају ручно, из разлога што су јако сложене, већ постоје софтверски пакети који решавају ове једначине. Самим тим, на основу података о испитаном мотору, добијају се резултати о процесима и перформансама у само неколико минута, што не би било могуће експерименталним путем.

Једна од најпознатијих једначина, односно функција која се користе приликом описивања процеса сагоревања у моторима СУС јесте Vibe функција. Vibe функција је од њеног настанка постала веома примењивана за описивање процеса сагоревања у моторима СУС. Међутим, сам настанак назива „Vibe функције“ је потпуно заборављена. Постоји много несугласица одакле стварно потиче назив ове функције. У различитим литературама она се може наћи под сличним, али ипак различитим именима, као што су:

- Wiebe;
- Weibe и
- Vibe или Viebe функција.

Такође, може се пронаћи у литератури [1], која представља руски превод једног од радова SAE (*Society of Automotive Engineers* – Удружење аутомобилских инжењера), под својим именом али написаним ћирилицом „Вибе“.

Међутим, иако често коришћена функција, како је раније већ поменуто мало ко зна порекло њеног имена. Ова функција је добила име по Руском инжењеру Ивану Ивановичу Виебеу (слика 1.1), који је и њен творац.



Слика 1.1. Иван Иванович Виебе [2]

Иван Иванович Виебе је био Руски инжењер и научник са Урала. Рођен је 1902. године у Украјини. Факултет је завршио 1926. године. Истовремено је завршавао факултет и радио као механичар. Након дипломирања, завршио је посдипломске студије на Инжењерском Институту у Лењинграду. На овом институту, везаном за цивилну авијацију, 1932. године добио је звање „Кандидата Техничких Наука“, што се може упоредити са звањем доктора наука данашњице. Ово звање је добио радом на тему: теоретско истраживање процеса у дизел моторима са механичким убризгавањем (Theoretical investigation of the processes in diesel engines with solid-injection). Детаље свог истраживања, као и унапређивање функције сагоревања која је и добила име по њему, приказао је у монографији коју је издао на Политехничком Институту који је данас познат под именом „Државни Универзитет Јужног Урала“. На поменутом институту, Виебе је био водећи професор одељења за моторе СУС, све до његове смрти 1969. године.

Може се рећи да је Виебе постао истакнути научник у Совјетском Савезу, учешћем на конференцији о клипним моторима, организованој од стране Академије Наука СССР (Савез Совјетских Социјалистичких Република), која је одржана у Москви 1954. године. На поменутој конференцији је презентовао свој добро познати рад Полу-емпиријски израз за стопу сагоревања у моторима (Semi-empirical expression

for the combustion rate in engines). Прва литература везана за Виебе-ов закон сагоревања, која се појавила ван Совјетског Савеза, била је у Немачкој, наведена у раду Фрика (Frick) и Џантеа (Jante) са Техничког Универзитета у Дрездену. Такође, раније поменути монографија Виебе-а преведена је на Немачком језику, од стране Франца Меиснера (Franz Meissner), који је био професор на Универзитету Примењених Наука у Цвикау. Овако преведена монографија издата је 1970. године [3].

Раније поменути научник Џанте је Виебе писао и изговарао као „Vibe“, одакле и потиче назив Vibe функција. Тек касније се у неким енглеским техничким књигама поново појавило право презиме овог научника „Wiebe“.

Виебе је иначе најпознатији по томе што је развио аналитички модел сагоревања у моторима, познат под именом „Vibe функција“. Овај модел развијен је раних педесетих година у СССР-у. Развијен је у покушају да се створи предвидљив модел који би што реалније описао процес сагоревања у моторима СУС. До тада се у СССР-у користио рачунски модел познат под именом „Грневетски–Мазинг“. У питању је термодинамички метод, који описује процесе у моторима СУС и који се користи за потребне прорачуне. Овај метод је постављен 1907. године, од стране Василија Грневетског, који је био професор у Високој Техничкој Школи у Москви. Овај метод је до детаља описан и може се пронаћи у великом броју руских књига. Овај метод је дуго времена коришћен за описивање процеса сагоревања, како у бензинским тако и дизел моторима. Овај метод је идентичан термодинамичким процесима.

Међутим, Виебе као и многи други научници су се сложили са тиме да истраживање процеса у моторима СУС захтевају другачији приступ од раније поменутог метода. 1954. године Константин Генкин је приказао рад везан за истраживање којим се бавио у Моторској Лабораторији Академије Наука, у коме је серијом геометријских облика описао ослобађање топлоте током различитих фаза процеса сагоревања. Ово је било слично прилазу који је касније приказао Лин (Lyn) у Уједињеном Краљевству 1960. године. Он је ослобађање топлоте у дизел моторима приказао са једним или са два троугла. За разлику, од ова два научника Виебе је при описивању процеса сагоревања приступио теоријом базираној на хемијским ланчаним реакцијама.

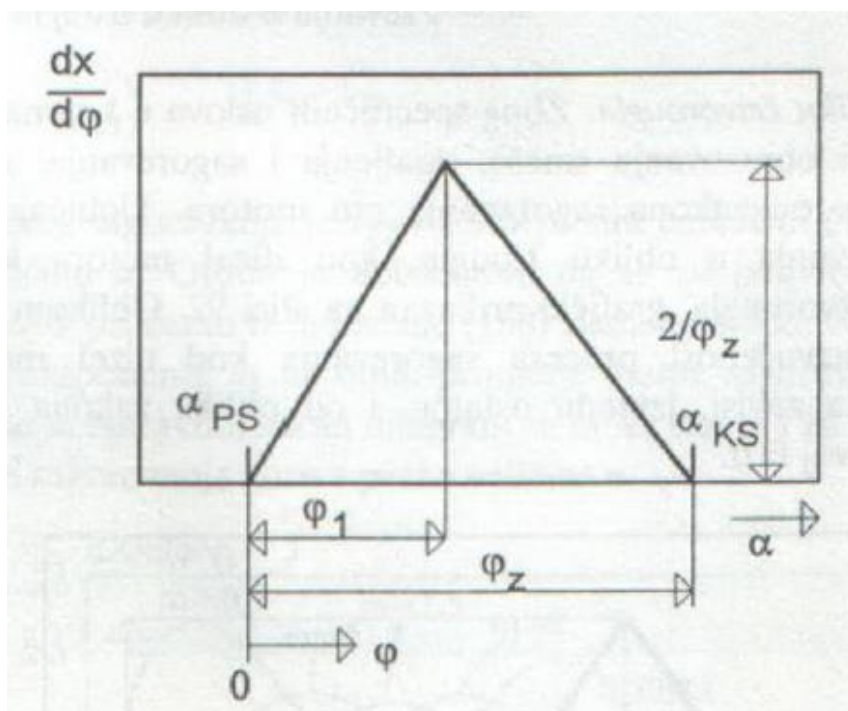
1.1 Значај и врсте Vibe-функције у термодинамичким прорачунима мотора СУС

Закон сагоревања, у принципу се може одредити на два начина и то:

- први се базира на претходном задавању одговарајућих емпиријских и полуемпиријских формула, аналитичких израза за функцију сагоревања или брзину сагоревања и
- други начин се базира на обради снимљеног индикаторског дијаграма.

Иако је мање тачан, први начин се веома често користи приликом прорачуна и пројектовања новог мотора, код коришћење другог метода то практично није могуће. Постоји велики број могућности аналитичког задавања закона сагоревања преко емпиријских и полуемпиријских формула. У овом раду биће поменути само неки од њих и касније ће бити анализирана њихова сличност са Vibe-овом функцијом.

Први је закон сагоревања у облику троугла (слика 1.2). Овај закон графички приказује процес сагоревања ОТО мотора.



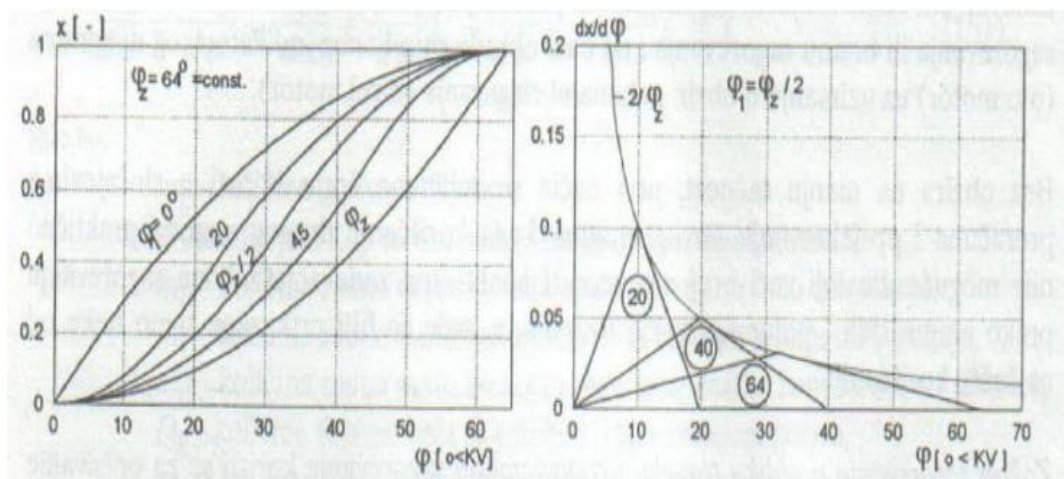
Слика 1.2. Закон сагоревања у облику троугла [4]

Са слике 1.2 може се видети графички приказ закона сагоревања у функцији угла коленастог вратила где су:

- α_{ps} - угао почетка процеса сагоревања;
- α_{ks} - угао завршетка процеса сагоревања;
- φ - угао који се мери од тренутка када започне процес сагоревања;
- $\varphi_z = \alpha_{ks} - \alpha_{ps}$ - угао трајања процеса сагоревања и
- φ_1 - угао који дефинише дужину првог периода закона сагоревања.

Закон сагоревања у облику троугла, графички је представљен са две дужи, које с одсечком апсцисе граде троугао, по чему је и добио назив. Његов аналитички израз се може добити ако се напишу једначине правих које садрже поменуте дужи. Интегралењем тако добијених аналитичких израза, добићемо релативну количину сагорелог горива x , при чему се константе интегралења као и висина троугла одређују на основу следећих услова:

- $\varphi = 0$;
- $x = 0$;
- $\varphi = \varphi_z$ и
- $x = 1$.

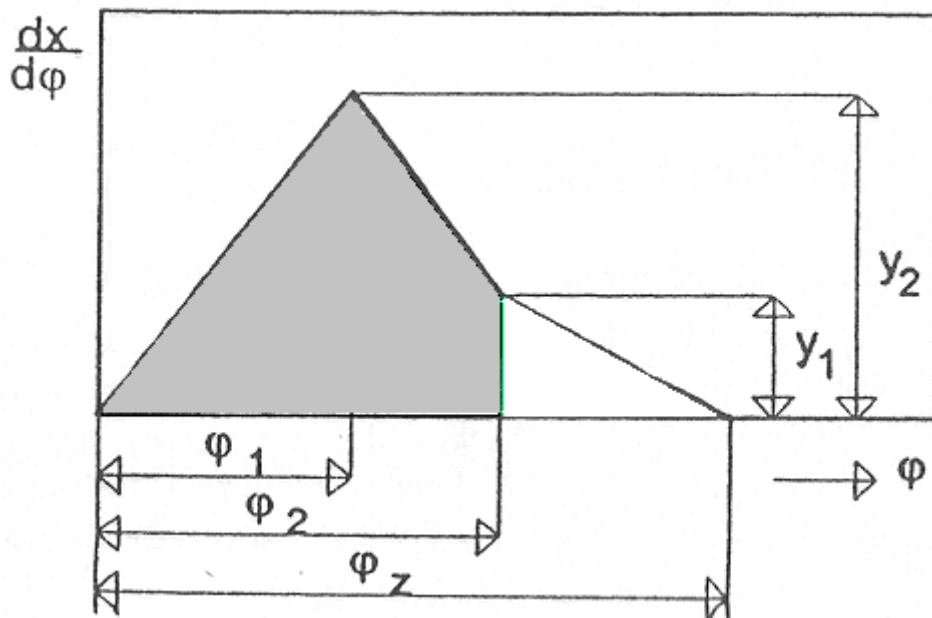


Слика 1.3. Утицај величине φ_1 на релативну количину сагорелог горива (лево); утицај дужине трајања процеса сагоревања φ_z на облик закона сагоревања у облику троугла (десно) [4]

На слици 2.1 дат је утицај дужине сагоревања на облик закона сагоревања. Може се видети утицај величине φ_1 на релативну количину сагорелог горива x , при истој вредности φ_z . На слици десно, приказан је утицај дужине трајања процеса сагоревања φ_z , на облик закона сагоревања, при истој вредности φ_1 .

Други закон сагоревања, јесте закон сагоревања у облику четвороугла. Овај закон сагоревања је типичан за дизел моторе. Због специфичних услова у којима се код

дизел мотора одвијају процеси образовања смеше, упаљења и сагоревања, његов закон сагоревања се разликује од оног који је раније приказан за ОТО мотор. Закон сагоревања у облику четвороугла је дат сликом 1.4.



Слика 1.4. Закон сагоревања у облику четвороугла [4]

Обликом овог закона обухваћена је развученост процеса сагоревања код дизел мотора, у фази догоревања, чија дужина зависи, између осталог, и од облика закона убризгавања, посебно у његовој задњој фази.

Избором углова φ_1 , φ_2 и φ_z дефинише се закон сагоревања у облику четвороугла, при чему се величине y_1 и y_2 добијају из одговарајућих граничних услова, као функције ових углова.

Закон сагоревања који се најчешће користи у прорачунским циклусима је закон сагоревања по Vibe–у који је дат следећим изразом:

$$x = 1 - e^{-a\left(\frac{\varphi}{\varphi_z}\right)^{m+1}} \quad (1)$$

Диференцирањем релације (1) добиће се следећи израз:

$$\frac{dx}{d\varphi} = \frac{a}{\varphi_z} (m+1) \left(\frac{\varphi}{\varphi_z}\right)^{-a\left(\frac{\varphi}{\varphi_z}\right)^{m+1}} \quad (2)$$

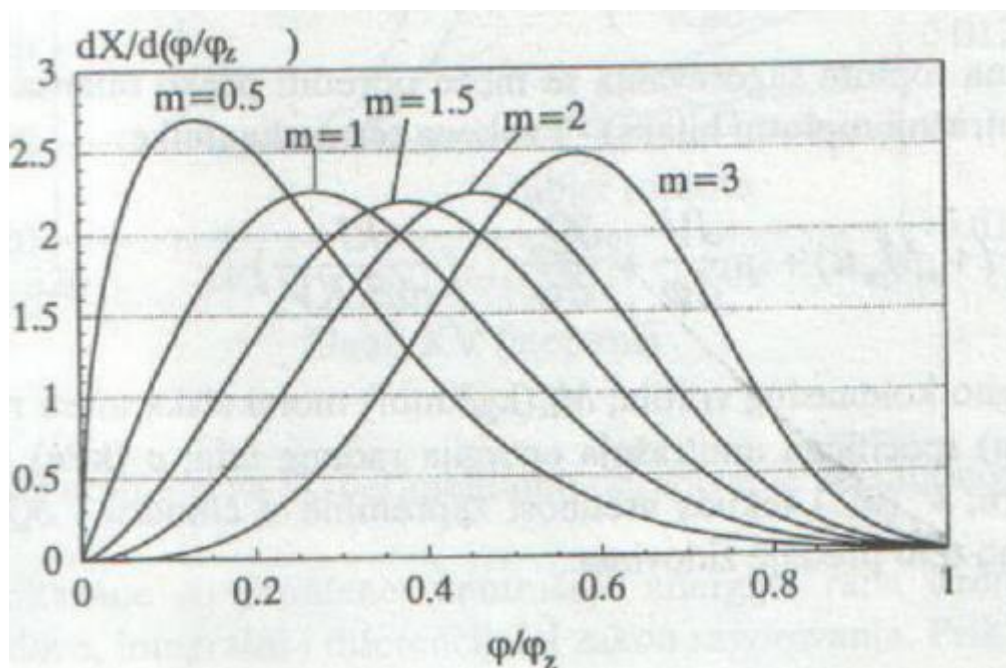
Облик Vibe-ове функције може се подешавати избором одговарајућих вредности за величине m и a које карактеришу потпуност сагоревања. Вредности које се усвајају за параметар m могу бити у распону $m = 1,0 - 3,0$.

Величину a дефинисаће се на следећи начин: на крају сагоревања $\varphi = \varphi_z$ и $x = x_{ks}$. Заменом ових услова у једначини (1) добија се вредност параметра a :

$$a = -\ln(1 - x_{ks}) \quad (3)$$

У случају потпуног сагоревања $x_{ks} = 1$, вредност параметра a биће бесконачна. Из овог разлога, уобичајено је да се за вредност x_{ks} усвоји $x_{ks} = 0,999$, па на основу тога вредност a биће $a = 6,908$.

Вредности експонента m , утиче на облик промене брзине сагоревања, при константној вредности a , може се видети на слици 1.5.

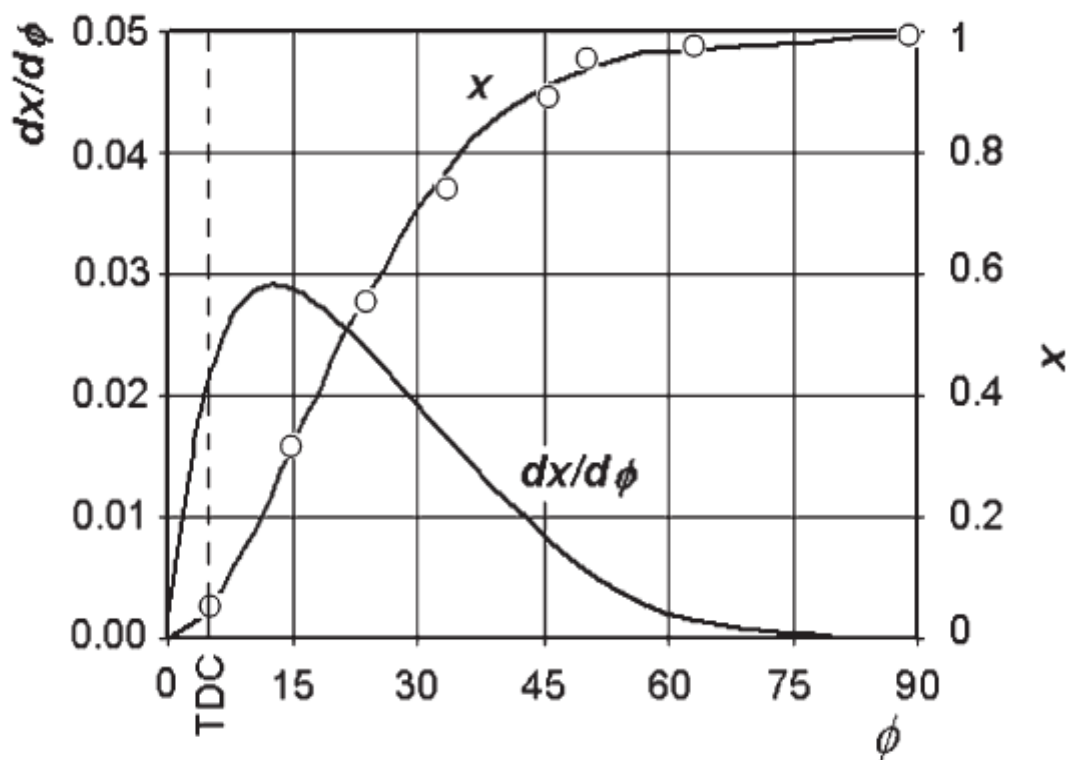


Слика 1.5. Утицај закона сагоревања по Vibe-у [4]

У принципу постоје две врсте Vibe функције и то:

- једностепенa Vibe функција и
- двостепенa Vibe функција.

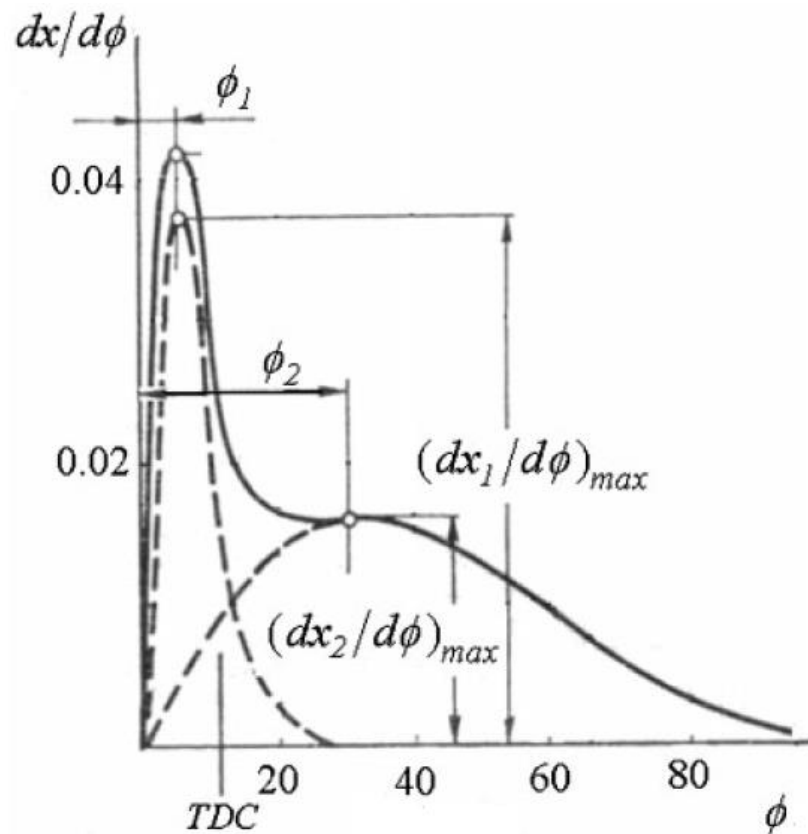
Изглед једноступене Vibe функције илустрован је сликом 1.6.



Слика 1.6. Изглед једностепене Vibe функције [3]

Ако се упореди слика 1.6 са сликом 1.2 на којој се налази закон сагоревања у облику троугла, може се видети да једностепена Vibe функција у великој мери подсећа на закон сагоревања у облику троугла. Самим тим, може се закључити да једностепена Vibe функција, описује закон сагоревања ОТО мотора.

Међутим, за дизел мотор ово није случај. За бољу апроксимацију прорачуна сагоревања код дизел мотора користи се такозвана двостепена Vibe функција. Изглед двостепене Vibe функције је дат сликом 1.7.



Слика 1.7. Двостепена Vibe функција [3]

Ако се упореди слика 1.7 са законом сагоревања у облику четвороугла може се видети велика сличност.

Двостепена Vibe функција се добија као збир одговарајућих функција из првог и другог интервала, приказано релацијама (4) и (5).

$$x = x_1 + x_2 \quad (4)$$

$$\frac{dx}{d\phi} = \frac{dx_1}{d\phi} + \frac{dx_2}{d\phi} \quad (5)$$

1.2 Теоријске основе одређивања параметара двостепене Vibe-функције на основу експерименталних података

Раније је поменуто, да је за описивање закона сагоревања дизел мотора, тачније речено дизел мотора са директним убризгавањем, најповољније користити двостепену Vibe-ову функцију. Циљ овог рада јесте да се на основу података добијених експериментом, добију параметри који описују Vibe-ову функцију.

Мерени подаци који се читавају са А/D конвертора се не могу у свом облику директно користити приликом одређивања параметара Vibe функције. Из тог разлога потребно их је спровести кроз програм за прорачун сагоревања који се дужи низ година користи на катедри за моторна возила и моторе [4]. Као улазни подаци у овај програм учитавају се:

- подаци о мотору;
- подаци о гориву и
- подаци о радном режиму.

Наведени подаци показани су табелама 1.1 – 1.3.

Табела 1.1. *Подаци о мотору*

Тип мотора и словна ознака	3LDA 450
Слово „о“ за ото или „d“ за дизел мотор	d
Ход клипа [mm]	80
Пречник клипа [mm]	85
Ексцентритет осовине клипа [mm]	0
Ексцентритет коленастог вратила [mm]	0
Број цилиндра мотора	1
Степен компресије мотора	17.5
Дужина клипаче мотора [mm]	145
Угао предпаљења [°KV]	18.5
Угао каснијег затварања усисног вентила [°KV]	40
Температура зидова коморе за сагоревање [K]	495

Табела 1.2. Подаци о гориву

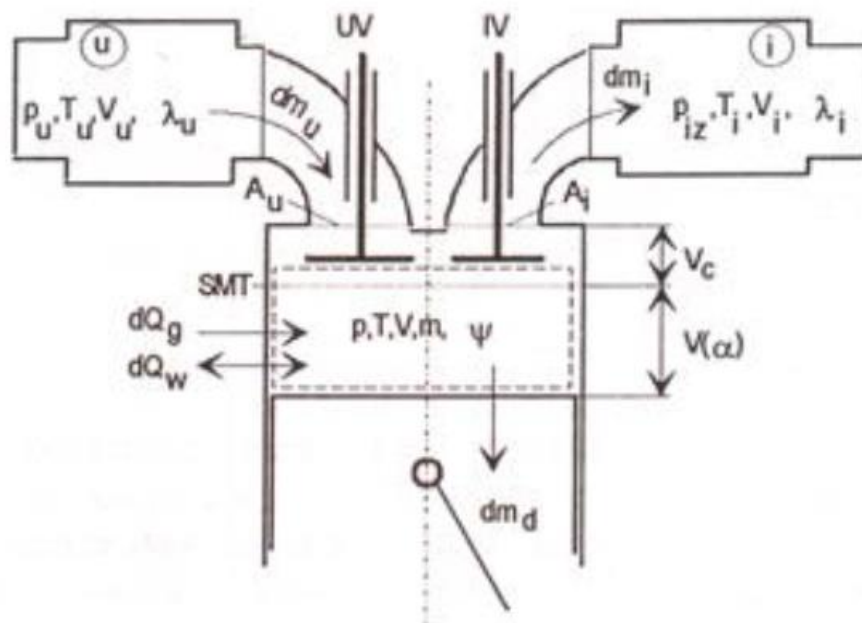
Доња топлотна моћ горива [kJ/kg]	42850
Садржај угљеника у горива [kg/kg]	0.86
Садржај водоника у гориву [kg/kg]	0.136
Садржај кисеоника у гориву [kg/kg]	0.004
Молекулска маса горива [kg/kmol]	195
^[1] Густина горива [g/cm ³]	1
^[1] Напомена: За вредност густине горива се узима јединица, зато што се потрошена количина горива мери масеном методом, а у програм за прорачун сагоревања се убацује вредност запремине	

Табела 1.3. Подаци о радном режиму

Угао корекције између два узорка притиска (степени)	1
Корекција SMT (степени)	0
Температура околине (°C)	25.1
Притисак околине (mbar)	992
Број обртаја мотора (o/min)	1020
Сила на кочници (daN)	0.08
Пречник бленде за мерење протока ваздуха (mm)	15
Висина воденог стуба за мерење протока (mm)	48
Запремина горива (cm ³)	5
Време потрошње тог горива (s)	127.3
Маса другог горива, у случају рада са два горива	0
Време потрошње тог горива	1

Програм за прорачун сагоревања, решава систем диференцијалних једначина, приказаних даљим текстом.

Ради лакшег објашњавања добијања једначина потребних за прорачун посматраће се слика 1.8.



Слика 1.8. Математички модел цилиндра [4]

Радни простор мотора СУС (слика 1.8) посматра се као отворени термодинамички систем. У току циклуса долази до промена количине радне материје које су узроковане њеним губитком кроз зазоре између клипа и цилиндра. У првом делу прорачуна обзиром да су губици кроз зидове цилиндра занемарљиви, радни простор можемо посматрати као затворени термодинамички систем. Усисни и издувни колектор се посматрају као одвојене термодинамичке целине које у одређеним деловима циклуса остварују везу са цилиндром преко заједничке границе. У том случају сматра се да су притисци у усисном и издувном колектору константни (p_u, p_{iz}) = const, као и да су дужине колектора мале, а запремине велике. Такође, користећи претпоставку о равнотежној промени стања у контролној запремини. Ова претпоставка ће за последицу имати то да су вредности величина стања (притиска и температуре) за посматрани тренутак времена, у свакој тачки радног простора једнаке.

Посматрајући слику 1.8 и полазећи од првог закона термодинамике може се написати релација (6).

$$dQ = dU + dL \quad (6)$$

где су :

- Q – укупно доведена количина топлоте;
- U – унутрашња енергија радне материје;
- $dL = p dV$ - елементарни рад ширења радне материје и
- V – тренутна вредност запремине радног простора.

За килограм масе радне материје која се тренутно налази у цилиндру, узимајући у обзир везу између апсолутне U и специфичне u унутрашње енергије радне материје, $U = mu$, релација (6) може се написати у следећем облику:

$$dQ = d(mu) + p dV \quad (7)$$

Диференцирањем релације (7) добија се:

$$dQ = u dm + m du + p dV \quad (8)$$

Уобичајено је да се процеси у мотору СУС прате у функцији запремине надклипног простора, односно угла коленастог вратила, па ћемо према томе једначину (8), то јест одговарајуће величине написати у облику извода по углу коленастог вратила α :

$$\frac{dQ}{d\alpha} = u \frac{dm}{d\alpha} + m \frac{du}{d\alpha} + p \frac{dV}{d\alpha} \quad (9)$$

Полазећи од једначине (9), доћи ћемо до одговарајућих диференцијалних једначина које описују стваран циклус мотора. У општем случају радна материја унутар цилиндра је реалан гас, који се састоји од ваздуха, горива и заосталих продуката сагоревања. Према томе специфичну унутрашњу енергију такве радне материје можемо изразити у функцији основних величина стања (притиска и температуре) и састава гаса ψ .

$$u = u(p, T, \psi) \quad (10)$$

У случају дизел мотора, однос количине горива и ваздуха је променљива, па се тиме и коефицијент количине ваздуха мења, при чему се може рећи да је $\psi = \lambda$.

Тотални диференцијал унутрашње енергије, у функцији три променљиве, можемо написати у следећем облику:

$$du = \frac{\partial u}{\partial p} dp + \frac{\partial u}{\partial T} dT + \frac{\partial u}{\partial \psi} d\psi \quad (11)$$

Ако се релација (11) сведе на угао коленастог вратила добија се:

$$\frac{du}{d\alpha} = \frac{\partial u}{\partial p} \frac{dp}{d\alpha} + \frac{\partial u}{\partial T} \frac{dT}{d\alpha} + \frac{\partial u}{\partial \psi} \frac{d\psi}{d\alpha} \quad (12)$$

Из једначине (12) извод унутрашње енергије можемо изразити по углу коленастог вратила:

$$\frac{du}{d\alpha} = \frac{1}{m} \left(\frac{dQ}{d\alpha} - u \frac{dm}{d\alpha} - p \frac{dV}{d\alpha} \right) \quad (13)$$

Уколико изједначимо десне стране једначина (12) и (13) и решимо тако добијену једначину по изводу температуре као резултат добићемо следећу једначину:

$$\frac{dT}{d\alpha} = \frac{1}{m \frac{\partial u}{\partial T}} \left(\frac{dQ}{d\alpha} - u \frac{dm}{d\alpha} - p \frac{dV}{d\alpha} - m \frac{\partial u}{\partial p} \frac{dp}{d\alpha} - m \frac{\partial u}{\partial \psi} \frac{d\psi}{d\alpha} \right) \quad (14)$$

Једначина (14) дефинише промену температуре гаса у цилиндру приликом одвијања циклуса. При познавању вредности температуре, коришћењем одговарајуће једначине стања, можемо одредити вредност притиска.

Ако је радна материја у цилиндру идеалан гас, одговарајућу једначину стања можемо изразити релацијом (15):

$$pV = mRT \quad (15)$$

У релацији (15) R представља гасну константу која се може изразити у функцији свих величина, као и унутрашња енергија:

$$R = R(p, T, \psi) \quad (16)$$

За решавање диференцијалних једначина биће потребно да се све једначине система напишу у облику првог извода по величини угла α , обзиром да нумеричке методе користе симултано решавање система диференцијалних једначина. Према томе прво ћемо извршити диференцирање обе стране једначине (15), а затим ћемо леву страну поделити са pV , а десну са mRT и тако добити следећи израз:

$$\frac{1}{p} \frac{dp}{d\alpha} = \frac{1}{V} \frac{dV}{d\alpha} = \frac{1}{m} \frac{dm}{d\alpha} + \frac{1}{R} \frac{dR}{d\alpha} + \frac{1}{T} \frac{dT}{d\alpha} \quad (17)$$

Решавањем једначине (17) по изводу притиска добићемо следеће:

$$\frac{dp}{d\alpha} = p \left(\frac{1}{m} \frac{dm}{d\alpha} + \frac{1}{R} \frac{dR}{d\alpha} + \frac{1}{T} \frac{dT}{d\alpha} - \frac{1}{V} \frac{dV}{d\alpha} \right) \quad (18)$$

Горе наведена једначина (13), дефинише промену притиска у цилиндру мотора у току циклуса, при чему је члан $dT/d\alpha$, одређен једначином (14), а извод гасне константе по углу α одређујемо диференцирањем израза (16) као функције са три променљиве:

$$\frac{dR}{d\alpha} = \frac{\partial R}{\partial p} \frac{dp}{d\alpha} + \frac{\partial R}{\partial T} \frac{dT}{d\alpha} + \frac{\partial R}{\partial \psi} \frac{d\psi}{d\alpha} \quad (19)$$

Обзиром да се интеграљење диференцијалних једначина врши у малим интервалима угла коленастог вратила $\Delta\alpha$, можемо, ради упрошћавања једначине (18), а и без веће грешке занемарити промене гасне константе $dR/d\alpha \approx 0 \Rightarrow R \approx \text{const}$ чиме добијамо следећу једначину:

$$\frac{dp}{d\alpha} = p \left(\frac{1}{m} \frac{dm}{d\alpha} + \frac{1}{T} \frac{dT}{d\alpha} - \frac{1}{V} \frac{dV}{d\alpha} \right) \quad (20)$$

Како би се одредила промена температуре и притиска радне материје у цилиндру мотора, у функцији угла коленастог вратила, односно решавањем једначина (14, 18 и 20) морају се дефинисати први изводи свих величина на десној страни ових једначина. Да би смо ово урадили поћи ћемо од физичког модела цилиндра са слике 1.8 и на основу тих наведених величина написати следеће зависности за промену количине радне материје,

$$\frac{dm}{d\alpha} = \delta \frac{dm_g}{d\alpha} + \frac{dm_u}{d\alpha} - \frac{dm_i}{d\alpha} - \frac{dm_d}{d\alpha} \quad (21)$$

промену укупне количине топлоте:

$$\frac{dQ}{d\alpha} = \frac{dQ_g}{d\alpha} - \frac{dQ_w}{d\alpha} + \frac{dm_u}{d\alpha} i_u - \frac{dm_i}{d\alpha} i_i - \frac{dm_d}{d\alpha} i \quad (22)$$

где су:

- m_g – количина горива у цилиндру;
- δ – коефицијент који за ОТО мотор износи 0, а за дизел 1;
- m_u – количина радне материје која уђе у цилиндар у току усисавања;
- m_i – количина радне материје која изађе из цилиндра у току издувавања;
- m_d – количина радне материје која прође кроз зазоре између клипа и цилиндра;
- Q_g – количина топлоте која се ослободи сагоревањем горива;
- Q_w – количина топлоте која се размени са зидовима радног простора и
- i , i_u , i_i – специфичне енталпије: радне материје у цилиндру, свеже радне материје и продуката сагоревања.

Обзиром да се у току одвијања циклуса горе наведене једначине мењају, неопходно је одредити њихове промене по углу коленастог вратила, сагласно једначинама (21 и 22) што ће бити приказано у наредним корацима.

Сагоревањем количине горива у цилиндру m_g ослобађа се количина топлоте коју можемо одредити из познате релације:

$$Q_g = m_g H_d \quad (23)$$

где је:

H_d – [kJ/kg] доња топлотна моћ горива.

Уколико се количина горива која сагори до посматраног тренутка времена m_g , сведе на укупну количину горива која се унесе у цилиндар за један циклус m_{go} , добија се бездимензиона величина x , која представља релативну количину сагорелог горива:

$$x = \frac{m_g}{m_{go}} \quad (24)$$

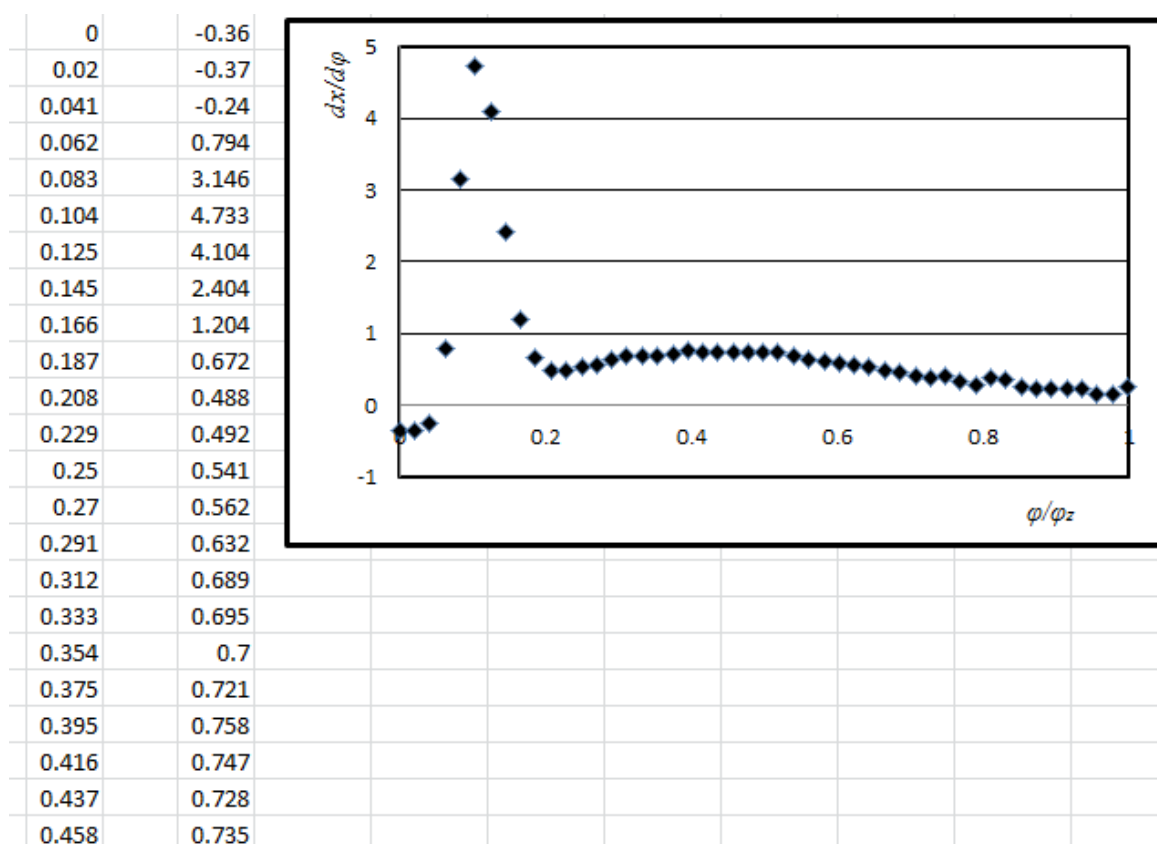
Ова величина карактерише потпуност сагоревања, па ће према томе при $m_g = 0$ имати вредност 0, а при $m_g = m_{go}$, имати вредност 1. Реалне вредности ове величине се налазе између 0 и 1. Имајући у виду ову карактеристику унећемо једначину (24) у једначину (23) и добити следеће:

$$Q_g = m_{go} H_d x \quad (25)$$

Диференцирањем дате количине топлоте по углу коленастог вратила добићемо једначину која дефинише закон сагоревања који одређује ток сагоревања. Величину x , назваћемо функцијом сагоревања, док ће њен извод по углу α дати брзину сагоревања:

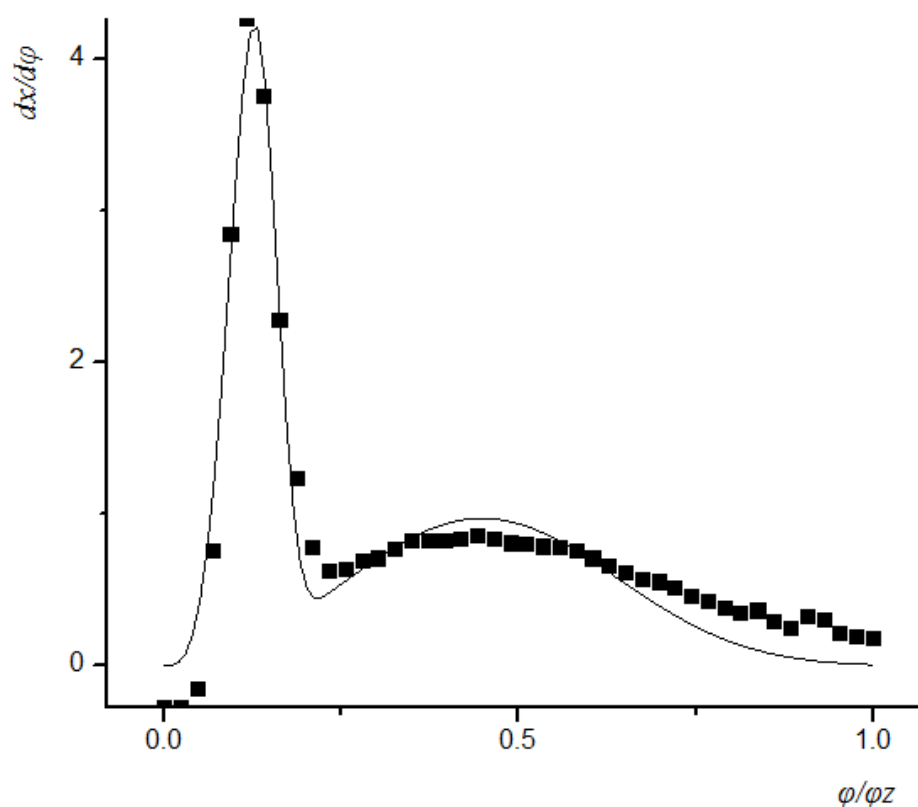
$$\frac{dQ_g}{d\alpha} = m_{go} H_d \frac{dx}{d\alpha} \quad (26)$$

Након што програм прорачуна претходно описане диференцијалне једначине добијају дискретне вредности диференцијалног закона сагоревања (слика 1.9).



Слика 1.9. Дискретне вредности диференцијалног закона сагоревања

Када се добију дискретне вредности, као на слици 1.9, треба преко одређене функције исцртати криву која ће пролазити кроз или веома близу ових вредности. Тачније речено, функција која ће што реалније описати закон сагоревања. Ова функција представља двостепену Vibe-ову функцију. Vibe функција се исцртава за сваки режим посебно, с тим да је на слици 1.10 приказан пример исцртане Vibe функције, за дискретне вредности раније приказаних на слици 1.9.



Слика 1.10. Приказ двостепене Vibe функције

Vibe функција са слике 1.10 је добијена помоћу софтверског пакета **OriginPro**. Математички облик функције која је убачена у програм, и која описује закон сагоревања је дата релацијом (27).

$$\frac{dx}{d(\varphi/\varphi_z)} = \frac{6,908}{\varphi_{z1}/\varphi_{z2}} \cdot (m_1 + 1) \cdot \left(\frac{\varphi}{\varphi_{z1}/\varphi_{z2}} \right)^{m_1} \cdot e^{\left(-6,908 \cdot \left(\frac{\varphi}{\varphi_{z1}/\varphi_{z2}} \right)^{(m_1+1)} \right)} \cdot \sigma_z \cdot k \quad (27)$$

$$+ 6,908 \cdot (m_2 + 1) \cdot \varphi^{m_2} \cdot e^{(-6,908 \cdot \varphi^{(m_2+1)})} \cdot (1 - \sigma_z) \cdot k$$

Сама функција која је исписна у програму је дата релацијом 28.

$$y = 6.908/c \cdot (a+1) \cdot (x/c)^a \cdot \exp(-6.908 \cdot (x/c)^{(a+1)}) \cdot d \cdot k + 6.908 \cdot (b+1) \cdot (x)^b \cdot \exp(-6.908 \cdot (x)^{(b+1)}) \cdot (1-d) \cdot k \quad (28)$$

Ако се упореде релације (27) и (28), може се уочити која ознака шта представља, осим ознаке „ k “. Ова ознака представља корекциони фактор који се додаје уколико се скраћује x -оса па интеграл испод криве није 1 него мањи и то баш за $-k$.

Такође, параметри ове функције чије одређивање представља тему рада, одређују се помоћу истог софтверског пакета, који има могућност одређивања ових параметара методом најмањих квадрата. Параметри које се одређују су [5]:

- m_1 – параметар облика првог дела Vibe функције;
- m_2 – параметар облика другог дела Vibe функције;
- $\varphi_{z1}/\varphi_{z2}$ – однос углова трајања првог и другог дела Vibe функције и
- σ_z – удео сагорелог горива током првог дела Vibe функције.

Поента је у томе, да се ови параметри одреде за више режима, односно при различитим бројевима обртаја и оптерећењима. Уколико се ово изврши, постоји могућност да се на основу вредности параметара добије законитост по коме се ови параметри мењају. Наравно ово је могуће уколико промене нису велике, те се промена параметар може описати линеарном, експоненцијалном или неком другом функцијом. Уколико је ово могуће, могуће је извршити предикцију, односно предвидети колико ће неки параметар износити у некој тачки радног поља. Наравно уколико су промене превише велике, у том случају је промена параметара непредвидива.

2 Експериментално истраживање

2.1 Опис мерне инструментације

Мерења током извођења експеримента организована су тако да се добије довољан број параметара за одређивање ефективних, индикаторских и емисионих показатеља мотора. Известан број мерења вршен је ради надзора виталних параметара мотора и пратећих система. На сваком од радних режима је помоћу појединачних мерила или мерних ланаца регистрован 21 резултат мерења. Стога је при извођењу завршног експеримента било неопходно присуство најмање три испитивача.

Посебна пажња посвећена је раздвајању струјних кругова лабораторијске нисконапонске мреже 13,8 V DC. Тиме је отклоњен утицај сметњи од енергетских потрошача (електропокретач, модули паљења и напајања горивом, актуатори...) на рад електронских мерних склопова. Интегрисани електро-генератор мотора је искључен и замењен екстерним стабилисаним усмерачем 13,8V/18A DC, чиме је отклоњен његов непредвидив утицај на одређивање механичког степена искоришћења мотора.

Уређаји од виталног значаја за рад мотора (микроконтролерски систем управљања са припадајућим рачунаром и систем за индицирање цилиндарског притиска са својим рачунаром) су напајани преко два UPS (*Uninterruptible Power Supply*) уређаја. Тиме је рад мотора постао независан од краткотрајних осцилација мрежног напона или нестанка напајања.

2.1.1 Мерење ефективног обртног момента и броја обртаја мотора

Оптерећивање и мерење параметара ефективне снаге мотора вршено је помоћу хидрауличке моторске кочнице **SCHENCK U1- 16h**, приказане на слици 2.1. 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.

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



Слика 2.1. Моторска кочница *SCHENCK U1- 16h*

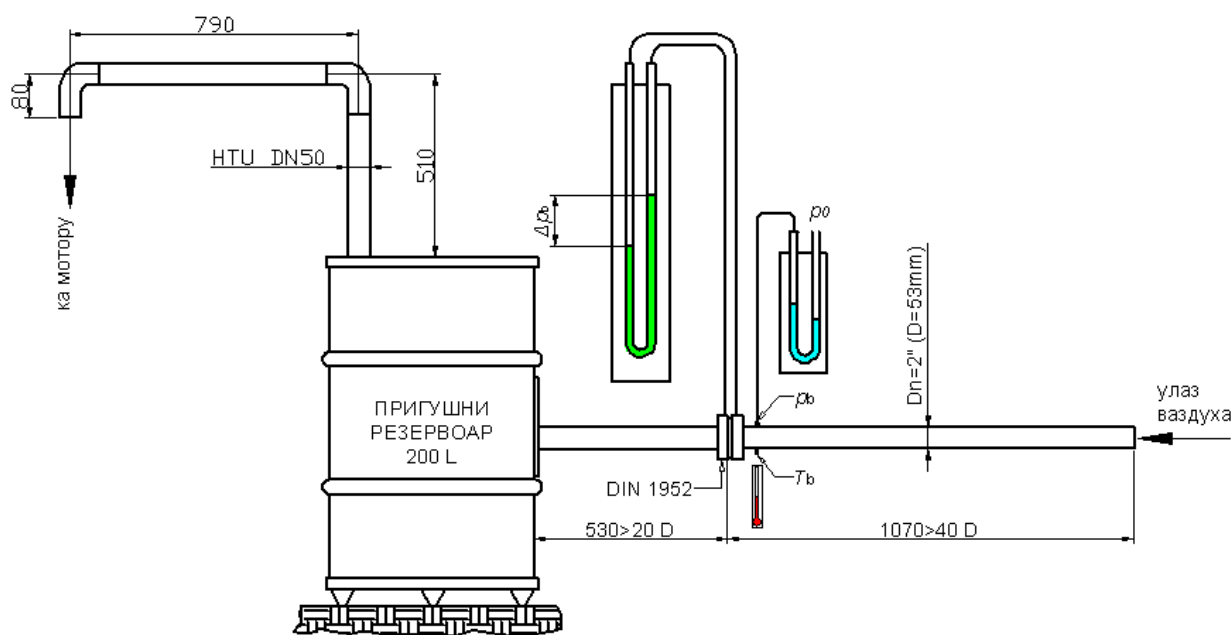
2.1.2 Мерење протока ваздуха

Како би било могуће прецизно мерити проток ваздуха неопходно је обезбедити устаљено струјање кроз отвор бленде. Иначе у случају нашег мерења коришћена је бленда пречника 20 mm. Бленда има облик кружног прстена са оштрим ивицама попут бленде дате на слици 2.2.



Слика 2.2. Бленда

С обзиром да мотори СУС побуђују струјне динамичке ефекте, потребно је на неки начин обезбедити устаљено струјање зарад прецизног мерења. Зато се користи резервоар који има запремину од две стотине литара. Овај резервоар омогућава устаљено струјање на тај начин што ако мотор на пример усиса пола килограма ваздуха из резервоара, за резервоар овакве запремине то представља минимално пражњење, односно нема никакав утицај. Бленда је постављена у прстену који се налази на цевоводу и водови везани за U манометар постављена су једно испред а друго иза бленде. На основу протока ваздуха, односно притиска испред и иза бленде, на манометру долази до подизања нивоа течности у једној а спуштања у другој цеви. Померање течности је за нас битно и оно се читава са лењира који је постављен поред манометра. Треба напоменути да пре стартовања мотора треба проверити да ли је ниво течности на нули. Наравно, да би мерење било прецизно потребно је имати и одређене димензије цевовода у инсталацији. Ове димензије су дефинисане стандардом DIN1952, с тим да се шематски приказ овакве инсталације са свим димензијама може видети на слици 2.3.



Слика 2.3. Шематски приказ инсталације за мерење протока ваздуха [6]

Према стандарду DIN1952 запремински (Q_v) и масени проток (Q_m) стишљивог флуида одређују се према следећим релацијама:

$$Q_v = \alpha \cdot k_\varepsilon \cdot A_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_b}{\rho}}, \text{ m}^3/\text{s} \quad (29)$$

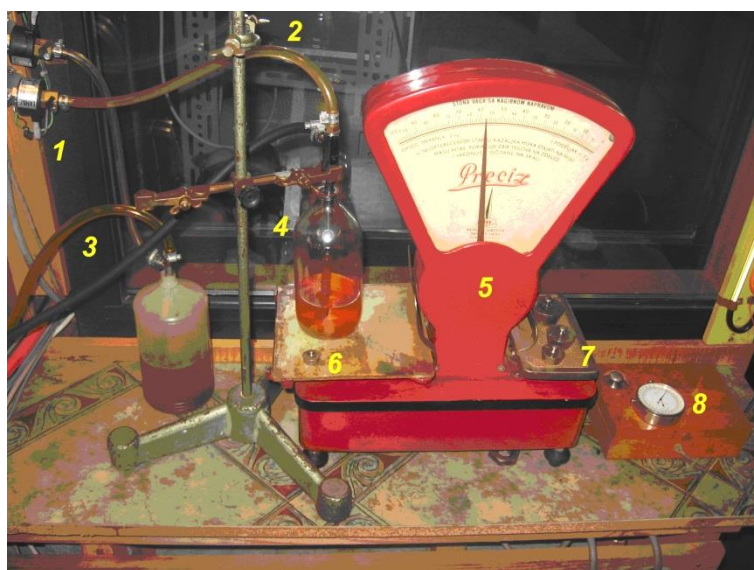
$$Q_m = \rho \cdot Q_v = \alpha \cdot k_\varepsilon \cdot A_0 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p_b}, \text{ kg/s} \quad (30)$$

Где су:

- α - коефицијент протока заслона;
- k_ϵ - експанзиони коефицијент;
- A_0 - проточна површина заслона;
- Δp_b - пад притиска на заслону и
- ρ - густина флуида испред заслона.

2.1.3 Мерење потрошње горива

Већ дуго 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 2.4.



1. Електро-вентил
2. Доводни вод
3. Одводни вод
4. Мерна посуда
5. Прецизна вага
6. Мерни тег
7. Баласт
8. Хронометар

Слика 2.4. Опрема за мерење потрошње горива масеном методом

Отварањем електровентила 1 се преко доводног вода 2 врши допуњавање мерне посуде 4. Затварањем вентила мотор троши гориво из мерне посуде 4 преко одводног вода 3. У припремној фази мерења потребно је да се вага доведе у стање приближне равнотеже избором масе баласта 7. Тада је показивач у мерном пољу скале опсега 100g, са поделом од 1g. На почетку мерења стартује се хронометар 8 и истовремено региструје положај показивача. Стављањем мерног тегу 6 на тас са мерном посудом 4 дефинише се маса узорка горива. Када показивач дође у положај са почетка мерења,

хронометар се зауставља. Избор масе узорка горива врши се у зависности од радног режима мотора тако да време потрошње није краће од 30 s.

Ма како изгледао анархично, овај метод има низ предности:

- практично неограничен мерни опсег, уз велику прецизност мерења малих потрошњи;
- тачност масе узорка горива одређена је класом тачности мерног тега (0,1 %);
- за разлику од запреминске методе, не мора да се води рачуна о густини горива;
- грешке у мерење уносе само хистереза ваге и промена нивоа горива у мерној посуди, а њихов утицај може бити безначајан и
- једноставан прелазак на мерење потрошње другог горива простом заменом спремне мерне посуде.

Главни проблем при оваквом начину одређивања потрошње је субјективне природе, јер испитивач мора бити веома концентрисан и увежбан.

2.1.4 Мерење температура

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

- издувних гасова t_{ig} (150÷750) °C;
- цилиндарске главе t_{cg} (80÷200) °C;
- уља у картеру t_u (60÷110) °C;
- ваздуха у уписном воду t_{uv} (20÷50) °C и
- ваздуха испред заслона (бленде) за мерење протока ваздуха t_b (15÷35) °C.



Слика 2.5. Опрема за мерење температура

У мерном ланцу употребљен је мерни систем *HBM UPM 60* опремљен десетоканалним модулом за подршку термопарова *UMH 3205* и прикључним панелом *VT 21* са компензатором температуре прикључака *VMA 3205* (слика 2.5). Мерни систем има аутоматску интерну компензацију температуре хладног краја термопарова. С обзиром да су мерења температура углавном упоредног и контролног карактера, њихова тачност није пресудна. Зато није вршена калибрација мерила температуре преко целог мерног опсега, већ су изведена контролна мерења у две тачке. За референтне температуре изабране су: температура топљења леда t_{ref1} и температура кључања воде t_{ref2} . Контрола је вршена баждареним живиним термометром опсега $(0\div100)$ °C, са поделом $1/10$ °C, гарантоване тачности $\pm 0,15$ °C на t_{ref1} , односно $\pm 0,25$ °C на t_{ref2} . Закључено је да је тачност мерења температура у оквиру тачности декларисане од стране произвођача мерне опреме.

2.1.5 Мерење притисака

➤ Мерење атмосферског притиска:



Слика 2.6. Барометар Brüel&Kjær U0003

Атмосферски притисак је мерен анеоридним, температурно компензованим барометром *Brüel&Kjær*, тип U0003. Инструмент је калибрисан на собној температури, при притиску 996 mbar. Као калибрациони барометар коришћен је лабораторијски барометар са живиним стубом (Торичелијев барометар).

Очитавање вредности атмосферског притиска вршено је на почетку и крају сваке секвенце испитивања, док је у случају појаве евентуалне разлике за прорачуне коришћена средња вредност.

Иван Грујић

➤ **Мерење диференцијалног притиска на заслону протокомера ваздуха:**



Слика 2.7. Мерила диференцијалног притиска

Ова величина мерена је паралелно са два мерила (слика 2.7):

- Помоћу воденог манометра вршена су мерења ради прецизног прорачуна протока ваздуха (ручни унос резултата мерења у записник) и
- Метални лењир за мерење висине воденог стуба одговара стандарду ГОСТ 427-75 и има поделу 1 mm.

Електронско мерило диференцијалног притиска *OMEGA PX 277*, опсега 7,5" (180,5 mm) воденог стуба коришћено је у систему управљања радом мотора (видети слику 2.21) ради одређивања протока ваздуха. Калибрација овог мерила извршена је помоћу воденог манометра.

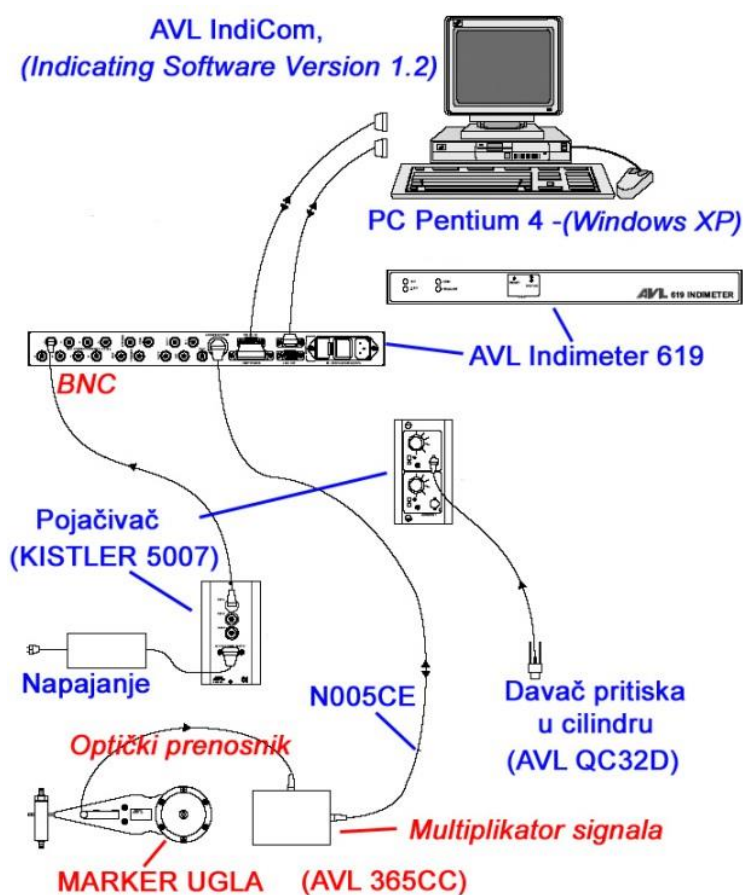
2.1.6 Мерење притиска у цилиндру мотора – индицирање

Мерни ланац за индицирање цилиндарског притиска остварен је применом савременог мерног система који је приказан на слици 2.8. Он се условно може поделити на четири целине:

- Аналогни део који чине пиезо-давач притиска *AVL QC32D* и појачавач за кондиционирање сигнала притиска *KISTLER 5007*;
- Дигитални део за управљање А/Д конверзијом кога чине: оптички маркер угла KB и положаја SMT (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./obt. Коришћено је 720 imp./obt;

- Процесор сигнала у реалном времену са 8-каналним А/Д конвертором (AVL Indimeter 619) и
- Персонални рачунар *Pentium 4* са софтверском подршком система *AVL IndiCom 1.2*.



Слика 2.8. Мерни систем за индицирање цилиндарског притиска [6]

Поред основне функције аквизиције сигнала у домену угла коленастог вртила овај систем још омогућава следеће:

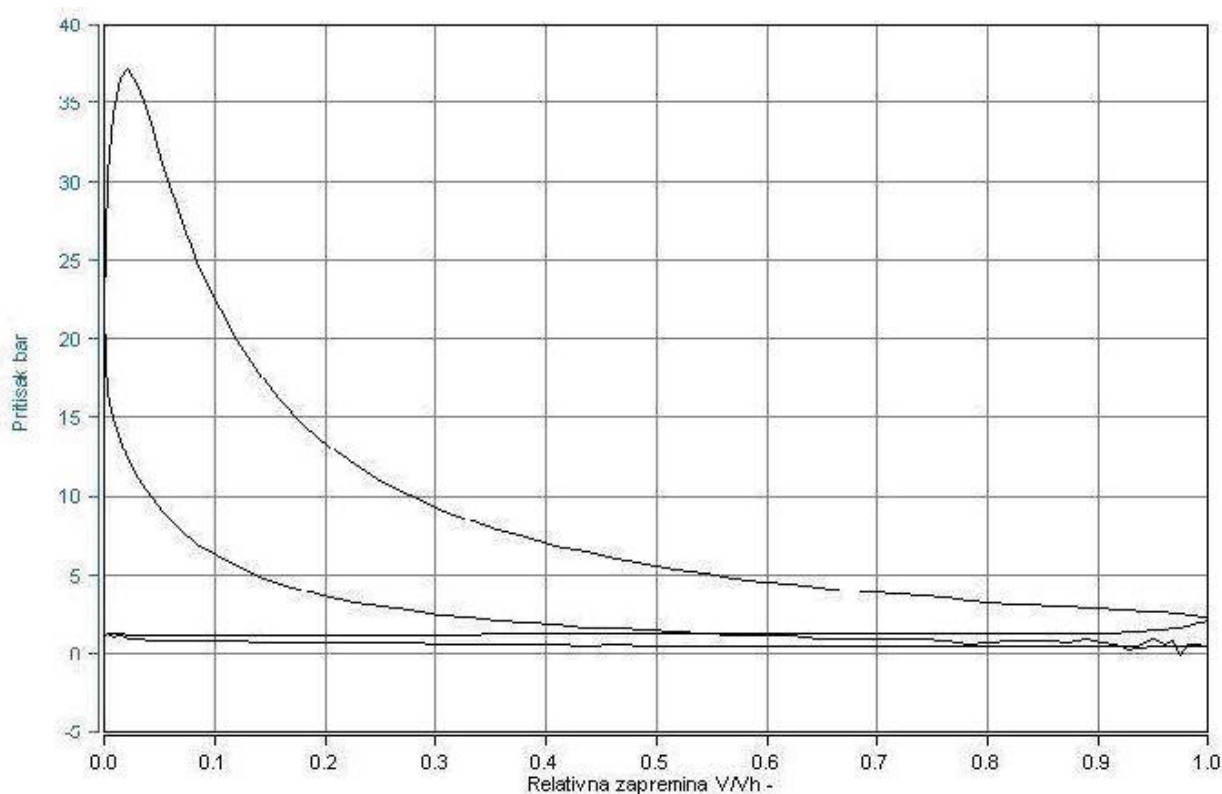
1. Осцилоскопски мод рада и мониторинг улазних сигнала или било ког сигнала добијеног њиховом обрадом у реалном времену (слика 2.9), мерење, типске прорачуне и приказ великог броја индикаторских параметара за практично произвољан низ узастопних циклуса:
 - максимални притисак циклуса P_{MAX1};
 - положај максималног притиска циклуса A_PMAX1;
 - максималну брзину пораста притиска R_PMAX1;
 - положај максималне брзине пораста притиска A_RMAX1;

- средњи индикаторски притисак циклуса IMEP1;
- средњи индикаторски притисак високо притисног дела циклуса IMEPH1;
- средњи индикаторски притисак ниско притисног 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 параметара за изабрани 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 2.10) и
- дијаграмски приказ диференцијалног и интегралног облика закона сагоревања (слика 2.11).

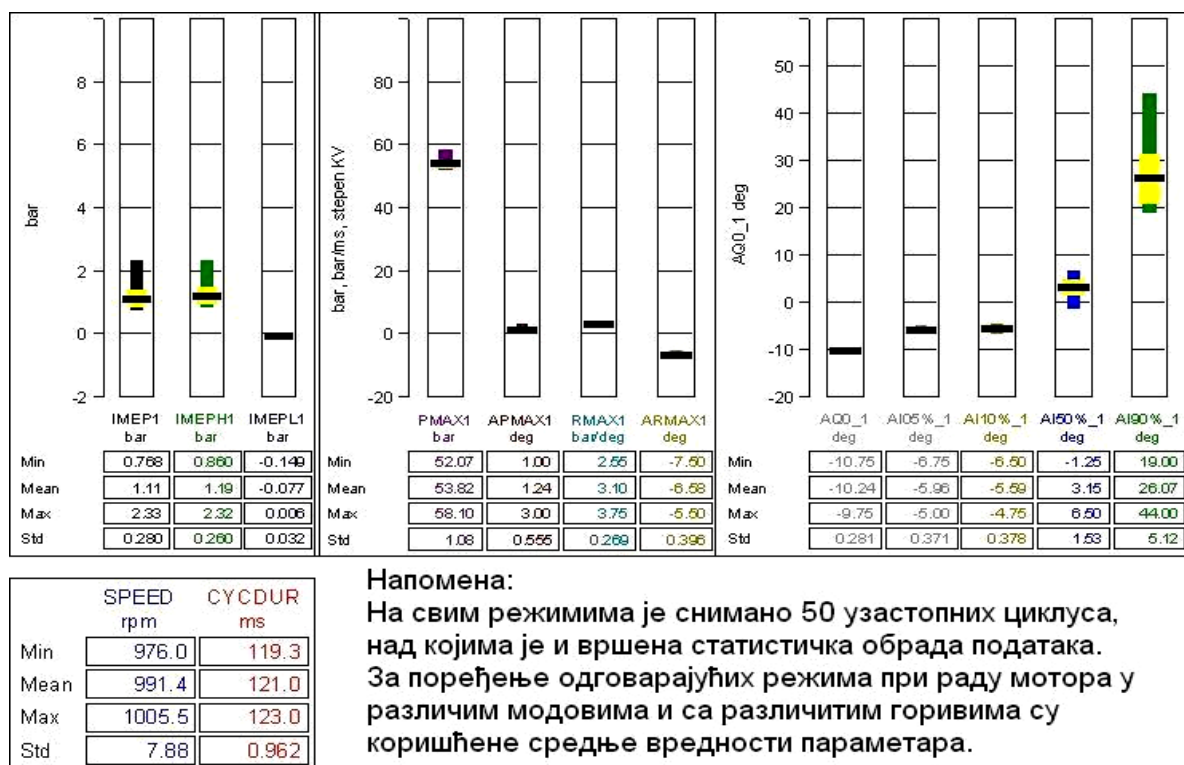
2 Флексибилну обраду података на бази прорачуна дефинисаног од стране корисника, као и кориснички дефинисану презентацију резултата;

3 Одређивање механичке грешке постављања маркера положаја SMT термодинамичком методом и

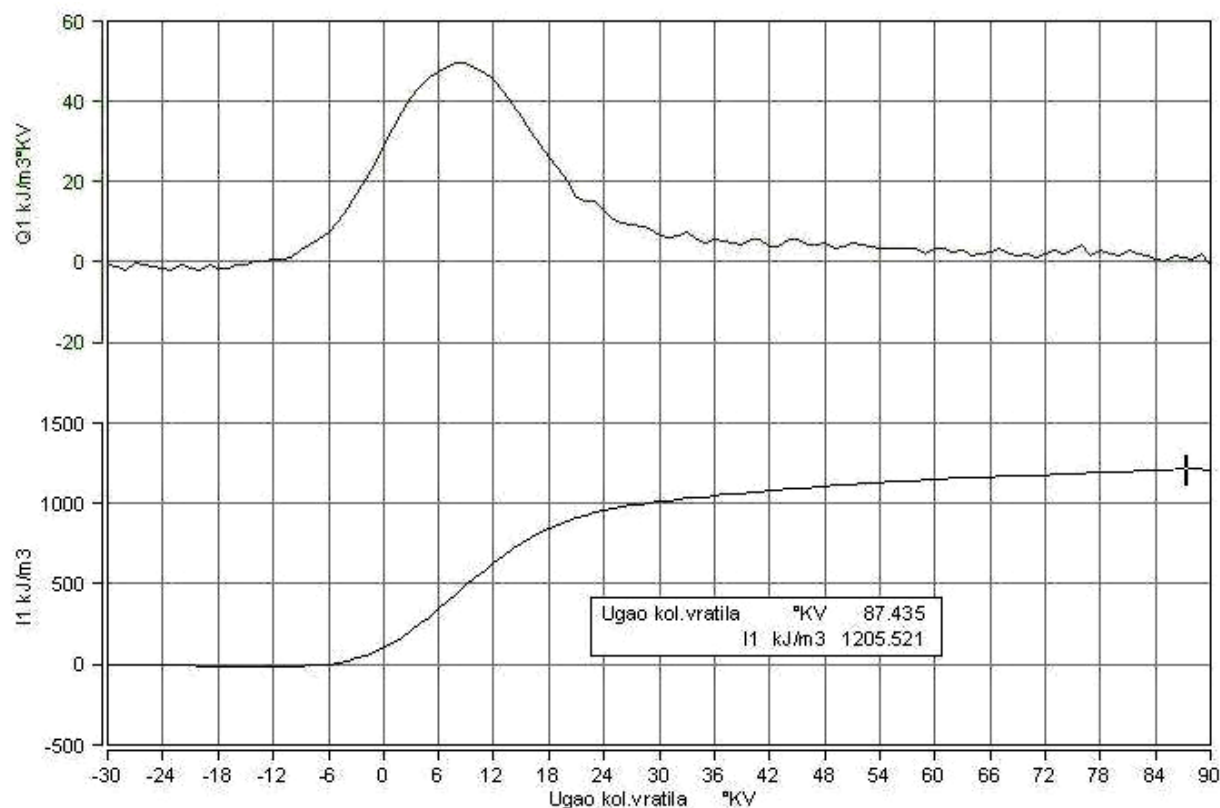
4 Калибрацију целокупног мерног ланца за мерење цилиндарског притиска динамичком методом.



Слика 2.9. Приказ затвореног индикаторског дијаграма на једном од режима



Слика 2.10. Приказ изабраних индикаторских параметара

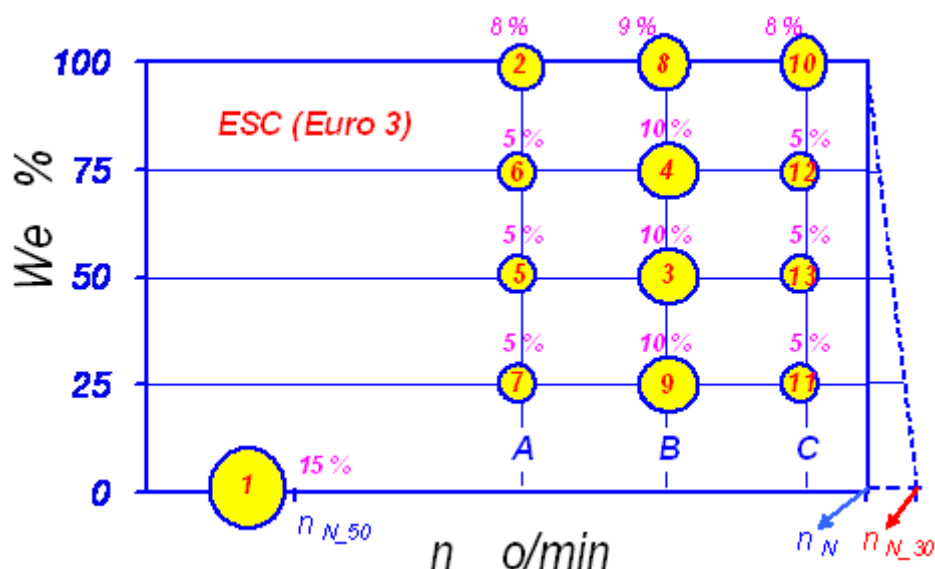


Слика 2.11. Приказ диференцијалног и интегралног облика закона сагоревања

3 Опис и резултати експеримента

У другом поглављу описана је мерна инсталација која се користила приликом експеримента. Самим тим, описан је начин мерења одређених величина током експеримента.

Мерење је извршено за 13 режима (приказано сликом 3.1).



Слика 3.1. Режији експеримента [7]

Ознаке са слике представљају:

- n_N — број обртаја мотора при номиналној снази;
- $n_{N_{30}}$ — број обртаја на коме снага падне за 30 % у односу на номиналну вредност;
- $n_{N_{50}}$ — број обртаја при паду снаге за 50 % у односу на номиналну вредност и
- $n_N = 3000 \text{ o/min}$ при номиналној снази мотора $P_N = 6 \text{ kW}$.

Референтни бројеви обртаја су одређени на следећи начин:

- Високи број обртаја, означен као $n_{N_{30}}$ са дијаграма снаге је одређен падом снаге за 30 % у односу на декларисану номиналну снагу (регулатор максималног броја обртаја активиран):

$$n_{N_{30}} = 3050 \text{ o} \cdot \text{min}^{-1}, (P_e = 0,7 \cdot P_N = 4,2 \text{ kW}).$$

- Низак број обртаја, означен као n_{N_50} , одређује се са спољно-брзинске карактеристике за услов пада снаге за 50 % од вредности декларисане номиналне снаге:

$$n_{N_50} = 1600 \text{ o} \cdot \text{min}^{-1}, (P_e = 0,5 \cdot P_N = 3 \text{ kW}).$$

Како се може видети са слике 3.1 мерење је извршено на три различита бројева обртаја, и четири оптерећења за сваки од броја обртаја. Што се тиче оптерећења, мерење је извршено на следећим вредностима оптерећења:

- $w_e = 0,14 \text{ kJ/dm}^3$, што представља 25% оптерећења од укупног;
- $w_e = 0,28 \text{ kJ/dm}^3$, што представља 50% оптерећења од укупног;
- $w_e = 0,42 \text{ kJ/dm}^3$, што представља 75% оптерећења од укупног и
- $w_e = 0,56 \text{ kJ/dm}^3$, што представља 100% оптерећења од укупног.

Бројеви у кружићима означавају који је режим измерен, при одређеном боју обртаја и оптерећењу. Бројеви обртаја за тачке А, В, С се добијају на основу следећих релација.

$$A = n_{N_30} + 0,25 \cdot (n_{N_50} - n_{N_30}) \quad (31)$$

Када се замене вредности за бројеве обртаја у релацији (31) добија се:

$$A = 3050 + 0,25 \cdot (1600 - 3050)$$

$$A = 1962 \text{ o} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$B = n_{N_30} + 0,50 \cdot (n_{N_50} - n_{N_30}) \quad (32)$$

Заменом вредности за бројеве обртаја у релацији (32) добија се:

$$B = 3050 + 0,50 \cdot (1600 - 3050)$$

$$B = 2325, \text{ o} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$C = n_{N_30} + 0,75 \cdot (n_{N_50} - n_{N_30}) \quad (33)$$

Заменом вредности за бројеве обртаја у релацији (33) добија се:

$$C = 3050 + 0,75 \cdot (1600 - 3050)$$

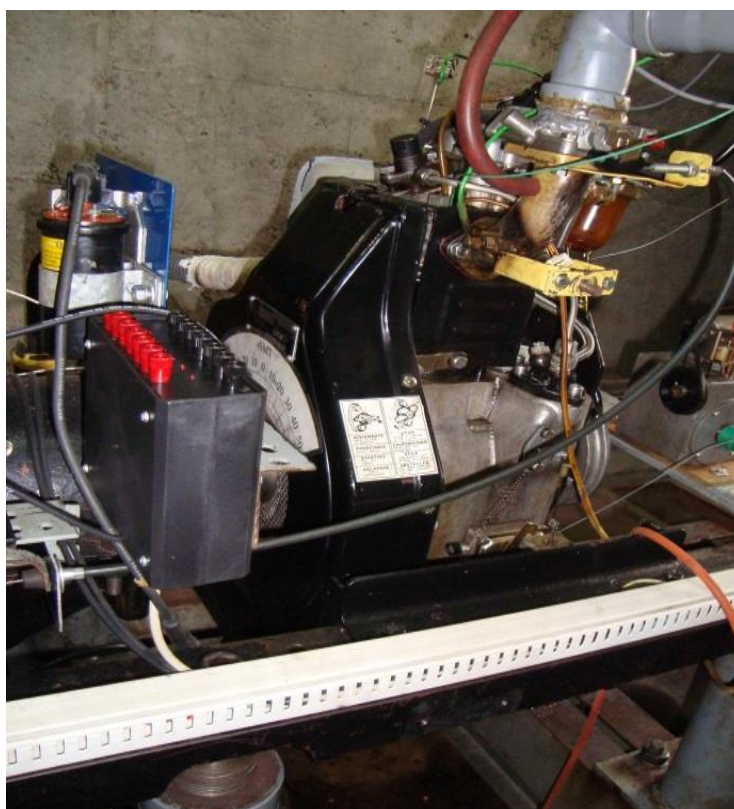
$$C = 2687, \text{ o} \cdot \text{min}^{-1}$$

Треба напоменути да је режим број 1, на празном ходу мотора без оптерећења. Самим тим приликом одређивања параметара Vibe функције овај режим неће бити

посматран, из тог разлога што не даје информације како режими утичу на поменуте параметре. Може се рећи да ће се параметри одређивати за укупно 12 режима.

3.1 Протокол испитивања

Мотор који је коришћен у експерименту је серијски мотор DMB 3LD 450, (приказан на слици 3.2).



Слика 3.2. Опитни мотор

У питању је моноцилиндрични, ваздушно хлађени дизел мотор са директним убризгавањем.

Пре сваког циклуса испитивања вршена је визуелна и функционална контрола лабораторијских инсталација, мотора и опреме. Температура моторног уља је одржавана у опсегу $60\text{ }^{\circ}\text{C} \leq t_{\text{u}} \leq 85\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При сваком режиму задао би се одређен број обртаја, као и сила на кочници. Како је већ раније приказано на слици 3.1 постоје велики скокови између режима. Односно, за различите бројеве обртаја, задата су различита оптерећења.

Иван Грујић

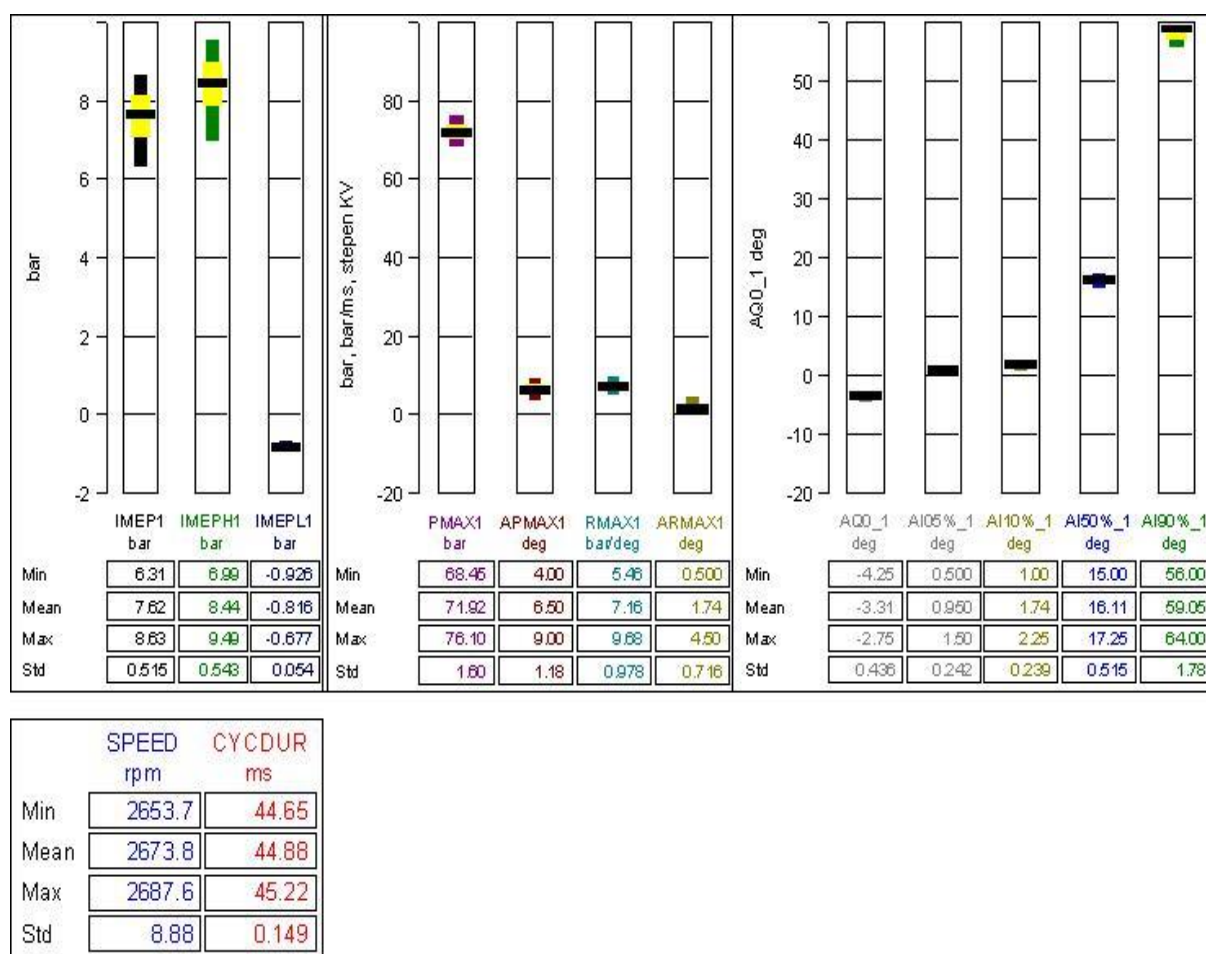
Након стабилизације испитног режима, вршено је индицирање у 50 узастопних циклуса као и мерења:

- параметара снаге;
- потрошње горива и ваздуха;
- температура;
- притиска и
- параметара издувне емисије.

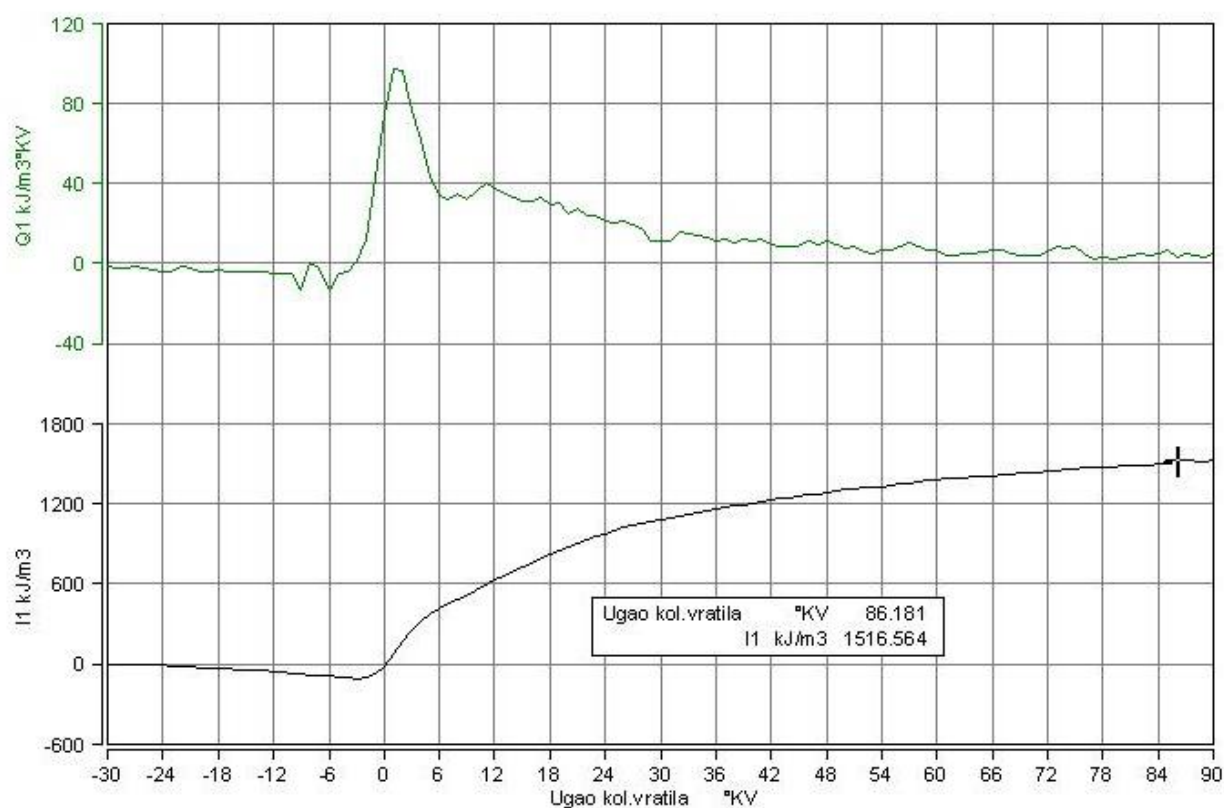
Индицирање у 50 узастопних циклуса је извршено за сваки од 13 режима.

Резултати индицирања су сачувани у три облика:

- статистички извештај (.JPG фајл) са вредностима изабраних параметара за 50 узастопних циклуса (пример на слици 3.3);
- дијаграм закона сагоревања осредњеног циклуса (.JPG фајл) са означеном специфичном количином доведене топлоте (слика 3.4) и
- датотека са подацима индицирања за осредњени циклус (AVL I_files).



Слика 3.3. Пример статистичког извештаја индицирања 50 узастопних циклуса



Слика 3.4. Диференцијални и интегрални закон сагоревања осредњених циклуса

Сви резултати мерења, као и вредности изабраних параметара добијених индицирањем (средњи број обртаја, осредњени специфични индикаторски рад и осредњена специфична количина топлоте), ручно су уношени у записник испитивања. Записник испитивања је сачињен у софтверском пакету **Microsoft Excel**. Приказ записника испитивања са подацима који су добијени током експеримента се могу видети на слици 3.5.

Слика 3.5. Записник испитивања

4 Утицај радних режима дизел мотора на параметре двостепене Vibe функције

На основу података са слике 3.5, као и коришћењем раније поменутих софтверских пакета извршено је одређивање параметара двостепене Vibe функције.

Тачније речено, параметри су одређени за сваки од режима, осим за први с обзиром да се из њега и не могу добити неке битније информације.

На сваком од режима познате су вредности оптерећења, које се такође могу видети на слици 3.5. Такође, како је раније приказано сликом 3.1 познато је за који режим, колико које оптерећење износи процентуално од укупног могућег оптерећења на том режиму.

Осим тога познате су и три вредности референтних бројева обртаја на којима је мерење вршено. Такође, на основу слике 3.1, се може видети на ком броју обртаја је био који режим.

Како су познате вредности параметара, као и на ком режиму су добијене, при тачном оптерећењу и при тачном броју обртаја. Могуће је извршити следеће:

- одредити зависност параметара од бројева обртаја при различитом оптерећењу и
- зависност параметара од оптерећења при различитим бројевима обртаја.

Ово се ради дијаграмски, те самом анализом дијаграма може се закључити како број обртаја и оптерећење утичу на параметре двостепене Vibe функције.

Наравно на крају ако криве на дијаграмима могу описати једначинама, могуће је у одређеној мери претпоставити колико ће неки параметар износити за неки од бројева обртаја при неком оптерећењу и обрнито.

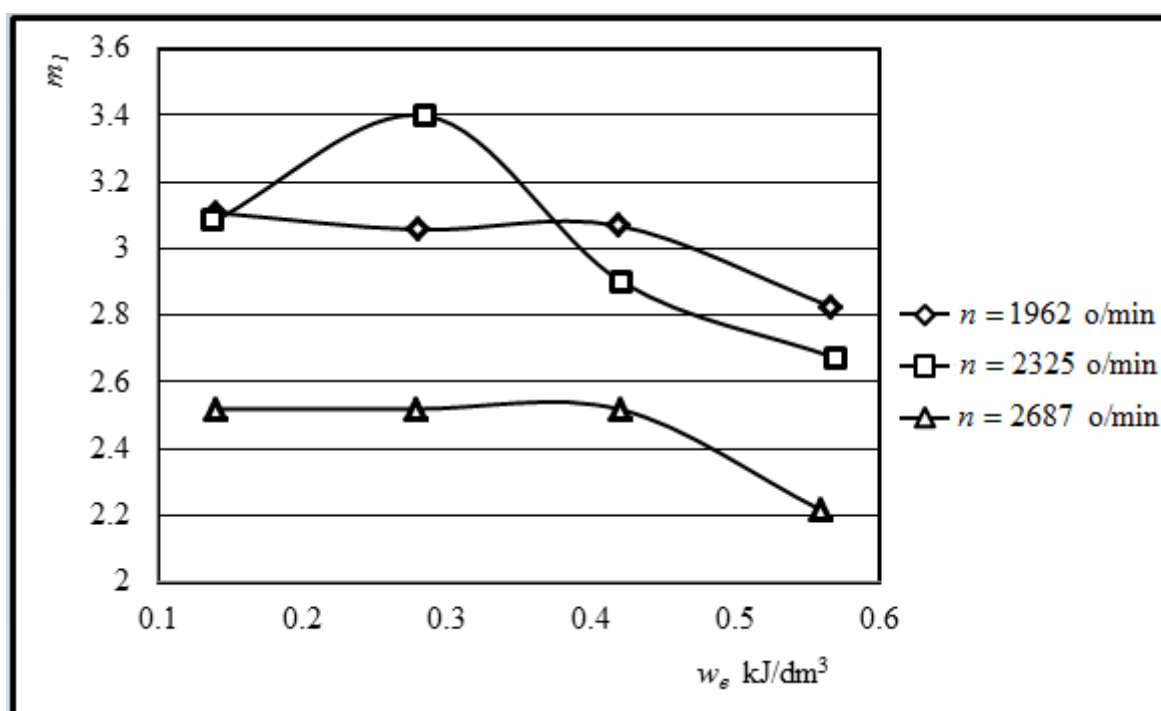
4.1 Параметар облика првог дела Vibe функције

Вредности параметра облика првог дела Vibe функције добијених прорачуном су дате табелом 4.1.

Табела 4.1. Вредности параметра облика првог дела Vibe функције

w_e	m_1A	m_1B	m_1C
$w_e = 0,14 \text{ kJ/dm}^3$	3.10738	3.0808	2.51906
$w_e = 0,28 \text{ kJ/dm}^3$	3.0562	3.39758	2.51919
$w_e = 0,42 \text{ kJ/dm}^3$	3.06918	2.89791	2.51787
$w_e = 0,56 \text{ kJ/dm}^3$	2.82621	2.67108	2.21854

На основу табеле 4.1 може се дијаграмски приказати зависност параметра облика првог дела Vibe функције од оптерећења, за различите бројеве обртаја (слика 4.1).



Слика 4.1. Зависност параметра облика првог дела Vibe функције од оптерећења, за различите бројеве обртаја

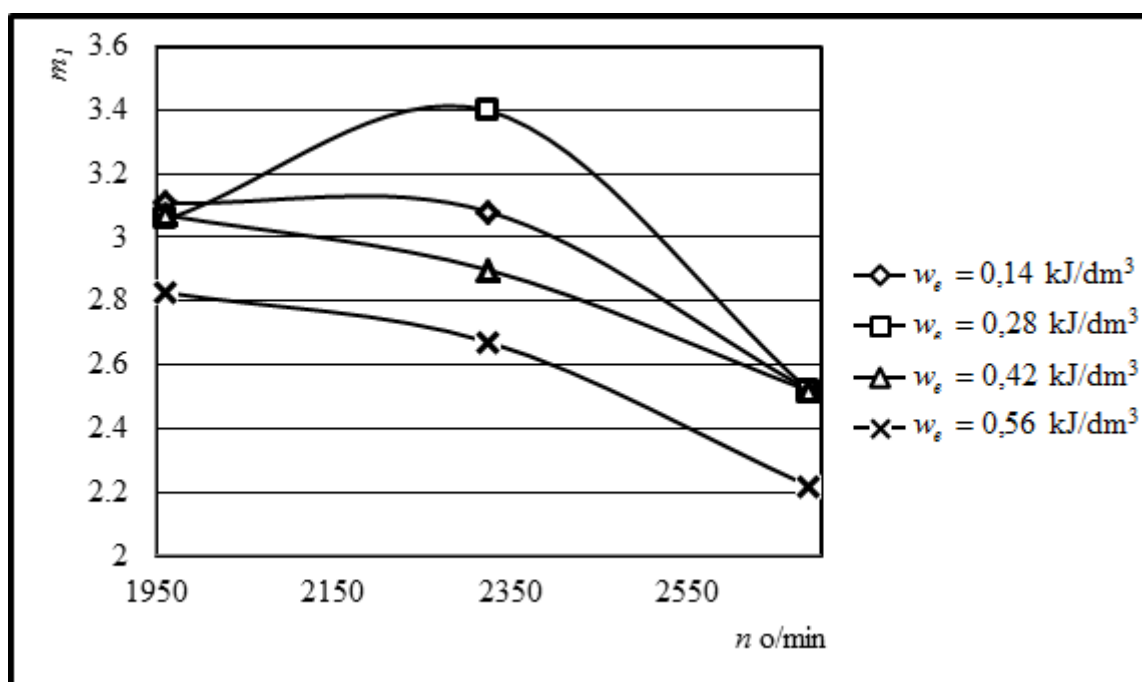
Посматрајући слику 4.1 не може се рећи тачно како оптерећење утиче на параметар облика првог дела Vibe функције. Може се напоменути да је највиша вредност овог параметра добијена за број обртаја $n = 2325 \text{ o} \cdot \text{min}^{-1}$, док је најнижа вредност добијена за број обртаја $n = 2687 \text{ o} \cdot \text{min}^{-1}$. Такође, ако се посматра облик криве за број обртаја $n = 2325 \text{ o} \cdot \text{min}^{-1}$, може се рећи да је овај параметар на овом броју обртаја непредвидив те се не може написати аналитички израз који описује његову промену у зависности од оптерећења. Једначине за друге две криве су приказане следећим релацијама.

$$n = 1962 \text{ o} \cdot \text{min}^{-1} \quad m_1 = -2,335 \cdot w_e^2 + 1,0584 \cdot w_e + 2,9895 \quad (34)$$

$$n = 2687 \text{ o} \cdot \text{min}^{-1} \quad m_1 = -3,875 \cdot w_e^2 + 2,0592 \cdot w_e + 2,2914 \quad (35)$$

Убацивањем вредности за оптерећење у ове једначине, може се добити вредност овог параметра на референтном броју обртаја.

Зависност параметра облика првог дела Vibe функције од броја обртаја, за различите вредности оптерећења је приказано сликом 4.2.



Слика 4.2. Зависност параметра облика првог дела Vibe функције од броја обртаја, при различитим оптерећењима

Како је приказано сликом 4.2 може се видети да параметар облика m_1 опада са повећањем броја обртаја. Ово није случај када мотор ради на 50% ($w_e = 0,28$ kJ/dm³) оптерећења. У овом случају постоји прво раст а затим поновно опадање вредности овог параметра. Иначе, све криве се могу описати једначинама, те се може предвидети вредност овог параметра заменом вредности за број обртаја. Једначине су приказане следећим релацијама.

$$w_e = 0,14 \text{ kJ/dm}^3 \quad m_1 = -2 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + 0,0087 \cdot n - 6,0519 \quad (36)$$

$$w_e = 0,28 \text{ kJ/dm}^3 \quad m_1 = -5 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + 0,0208 \cdot n - 19,973 \quad (37)$$

$$w_e = 0,42 \text{ kJ/dm}^3 \quad m_1 = -8 \cdot 10^{-7} \cdot n^2 + 0,0029 \cdot n + 0,3581 \quad (38)$$

$$w_e = 0,56 \text{ kJ/dm}^3 \quad m_1 = -1 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + 0,0044 \cdot n - 1,512 \quad (39)$$

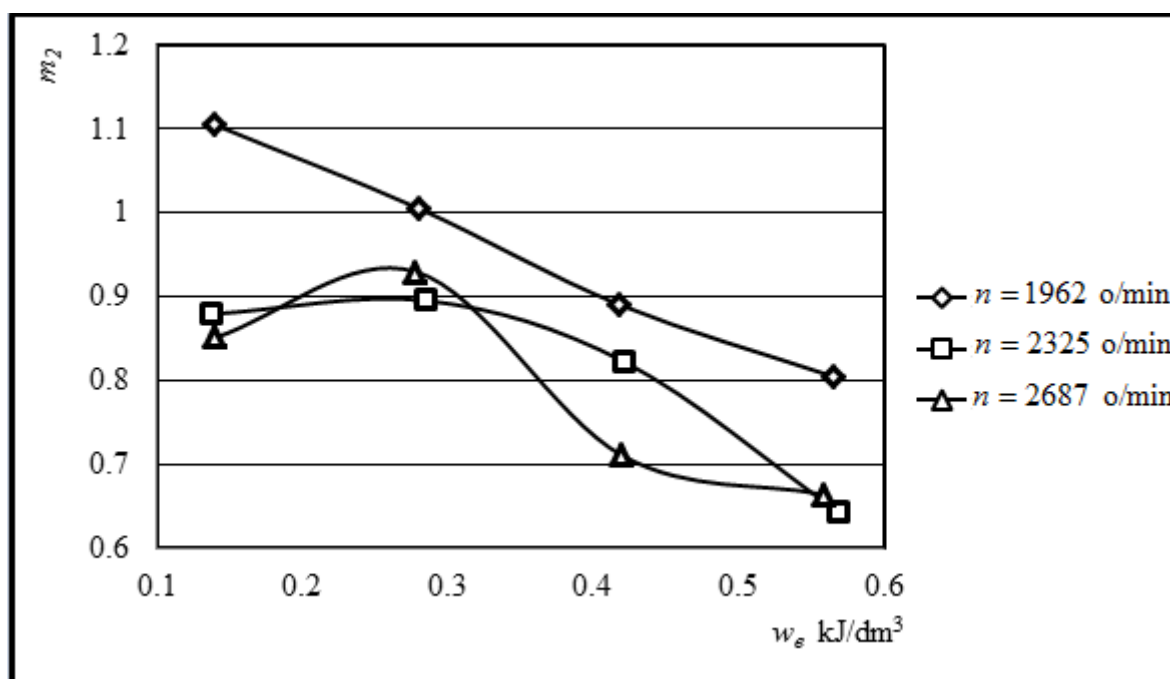
4.2 Параметар облика другог дела Vibe функције

Вредности параметра облика другог дела Vibe функције дате су табелом 4.2.

Табела 4.2. Вредности параметра облика другог Vibe функције

w_e	m_2A	m_2B	m_2C
$w_e = 0,14 \text{ kJ/dm}^3$	1.10494	0.87921	0.85103
$w_e = 0,28 \text{ kJ/dm}^3$	1.0053	0.89515	0.92975
$w_e = 0,42 \text{ kJ/dm}^3$	0.89045	0.82181	0.71034
$w_e = 0,56 \text{ kJ/dm}^3$	0.80414	0.64141	0.66409

Зависност параметра облика другог дела Vibe функције од оптерећења, за различите бројеве обртаја је приказан сликом 4.3.



Слика 4.3. Зависност параметра облика другог дела Vibe функције од оптерећења, за различите бројеве обртаја

Анализом слике 4.3, може се рећи да параметар облика m_2 опада са порастом оптерећења. Ово само није случај када је мотор радио на броју обртаја $n = 2687 \text{ o} \cdot \text{min}^{-1}$.

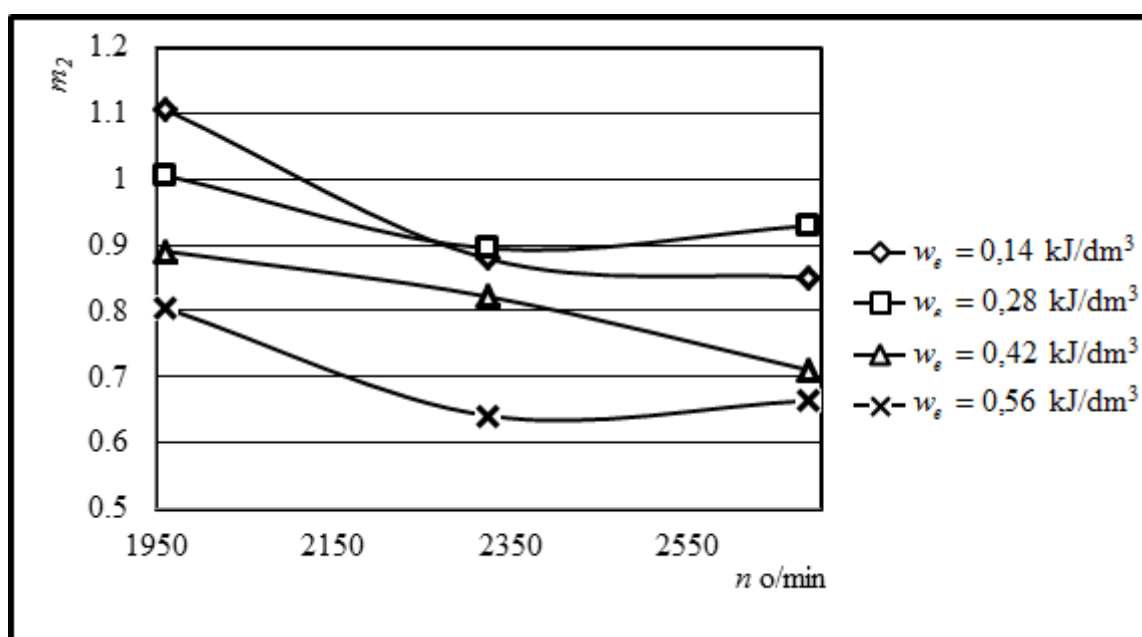
Иван Грујић

Такође, за овај број обртаја није могуће написати једначину промене овог параметра у зависности од оптерећења, па на основу тога може се рећи да је овај параметар непредвидив. За друге две вредности референтних бројева обртаја, једначине које описују промену параметра m_2 су дате следећим релацијама.

$$n = 1962 \text{ o} \cdot \text{min}^{-1} \quad m_2 = 0,2401 \cdot w_e^2 - 0,8874 \cdot w_e + 1,2271 \quad (40)$$

$$n = 2325 \text{ o} \cdot \text{min}^{-1} \quad m_2 = -2,3356 \cdot w_e^2 + 1,1042 \cdot w_e + 0,7711 \quad (41)$$

Зависност параметра облика другог дела Vibe функције од броја обртаја, за различите вредности оптерећења је приказано сликом 4.4.



Слика 4.4. Зависност параметра облика другог дела Vibe функције од броја обртаја, при различитим оптерећењима

Посматрајући слику 4.4. не може се тачно рећи како број обртаја утиче на параметар облика другог дела Vibe функције. Разлог томе је што криве које описују промену овог параметра у зависности од броја обртаја, за неке вредности константно опадају, а пак за друге опадају па поново расту. Међутим, ако се погледа за коју вредност оптерећења је која вредност овог параметра добијена, са сигурношћу се може рећи да се већа вредност параметра облика добија на нижим, а мања вредност параметра на вишим оптерећењима. Узимајући у обзир облик криви, лако се могу написати једначине помоћу којих се може предвидети промена овог параметра, а које су дате следећим релацијама.

$$w_e = 0,14 \text{ kJ/dm}^3 \quad m_2 = 8 \cdot 10^{-7} \cdot n^2 - 0,0038 \cdot n + 5,7478 \quad (42)$$

$$w_e = 0,28 \text{ kJ/dm}^3 \quad m_2 = 6 \cdot 10^{-7} \cdot n^2 - 0,0027 \cdot n + 4,1113 \quad (43)$$

$$w_e = 0,42 \text{ kJ/dm}^3 \quad m_2 = -2 \cdot 10^{-7} \cdot n^2 + 0,0005 \cdot n + 0,5137 \quad (44)$$

$$w_e = 0,56 \text{ kJ/dm}^3 \quad m_2 = 7 \cdot 10^{-7} \cdot n^2 - 0,0035 \cdot n + 4,8985 \quad (45)$$

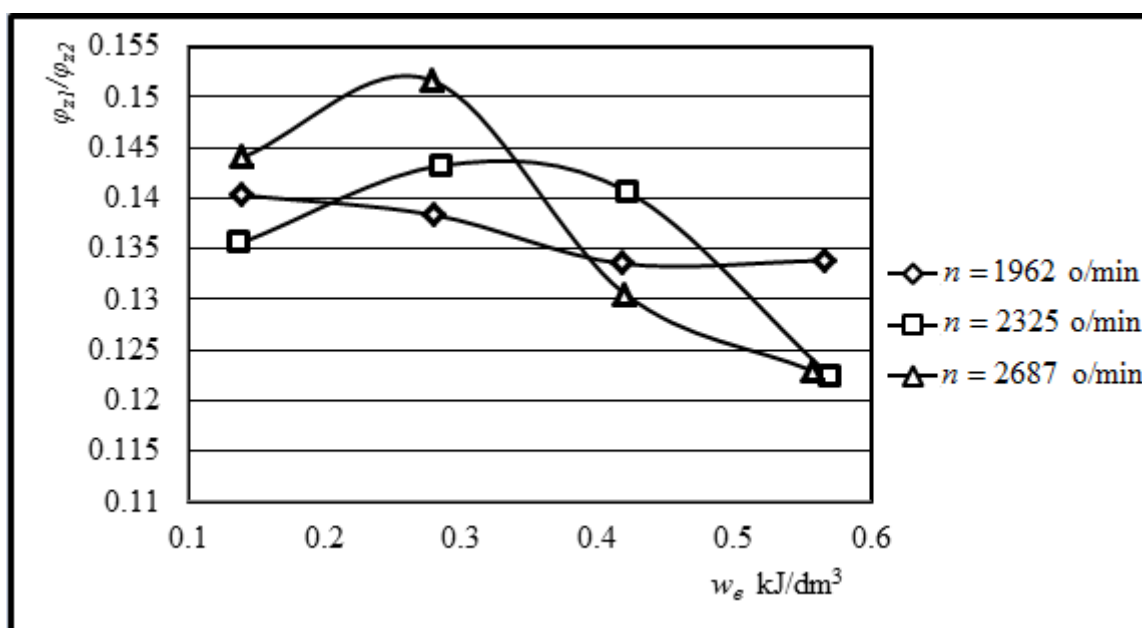
4.3 Однос углова трајања првог и другог дела Vibe функције

Вредности које су прорачуном добије на за овај параметар се могу видети у табели 4.3.

Табела 4.3. Вредности односа углова трајања првог и другог дела Vibe функције

w_e	$\varphi_{z1}/\varphi_{z2} A$	$\varphi_{z1}/\varphi_{z2} B$	$\varphi_{z1}/\varphi_{z2} C$
$w_e = 0,14 \text{ kJ/dm}^3$	0.14029	0.13552	0.14403
$w_e = 0,28 \text{ kJ/dm}^3$	0.13833	0.14322	0.15167
$w_e = 0,42 \text{ kJ/dm}^3$	0.13354	0.1406	0.13053
$w_e = 0,56 \text{ kJ/dm}^3$	0.13383	0.12244	0.1229

На на основу података из табеле 4.3, може се нацртати дијаграм зависности односа углова трајања првог и другог дела Vibe функције, од оптерећења за различите бројеве обртаја, приказано сликом 4.5.



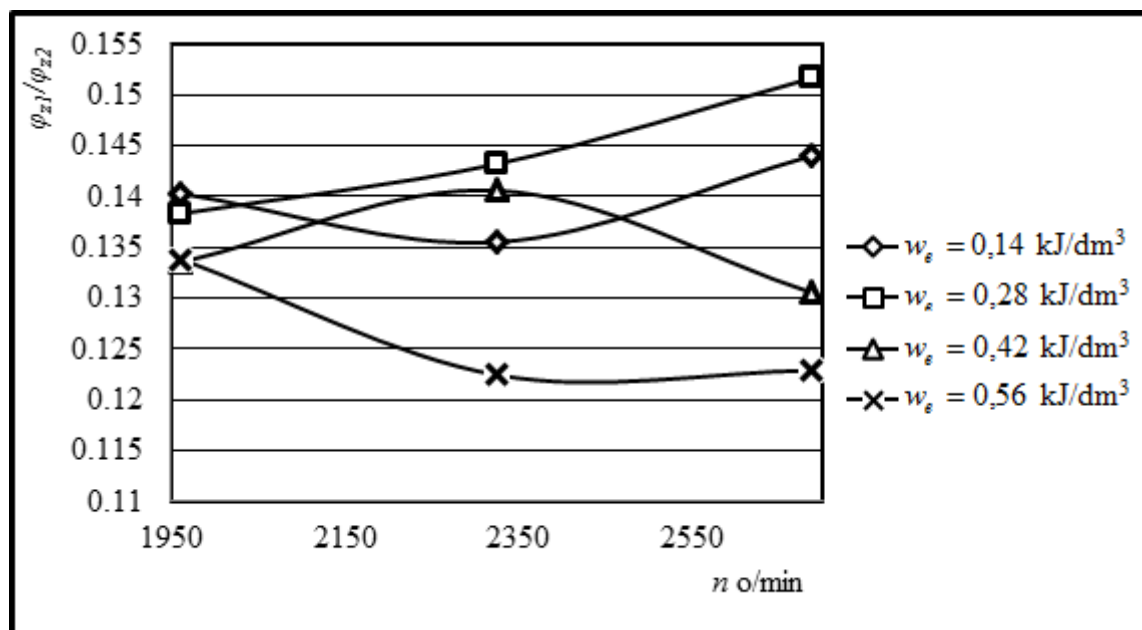
Слика 4.5. Зависност односа углова трајања првог и другог дела Vibe функције од оптерећења, за различите бројеве обртаја

Посматрајући слику 4.5 не може се тачно закључити како оптерећење утиче на овај параметар. Такође, за број обртаја $n = 2687 \text{ o} \cdot \text{min}^{-1}$ није могуће написати једначину по којој се он мења. Самим тим се за овај параметар при овом броју обртаја може рећи да је непредвидив. За друга два броја обртаја ситуација је другачија. Могуће је написати једначину која их описује, па самим тим предвидети њихову вредност за било које оптерећење на конкретном броју обртаја. Једначине за ова два броја обртаја су дате следећим релацијама.

$$n = 1962 \text{ o} \cdot \text{min}^{-1} \quad \varphi_{z1}/\varphi_{z2} = 0,0302 \cdot w_e^2 - 0,0383 \cdot w_e + 0,1455 \quad (46)$$

$$n = 2325 \text{ o} \cdot \text{min}^{-1} \quad \varphi_{z1}/\varphi_{z2} = -0,3076 \cdot w_e^2 + 0,1885 \cdot w_e + 0,1151 \quad (47)$$

Такође на основу података датих у табели 6.3, може се нацртати дијаграм промене овог параметра од броја обртаја, при различитим вредностима оптерећења, (слика 4.6).



Слика 4.6. Зависност односа углова трајања првог и другог дела Vibe функције од броја обртаја, при различитим вредностима оптерећења

Као и у случају дијаграма са слике 6.5 не може се са сигурношћу рећи, како број обртаја утиче на промену овог параметра. Може се једино јасно са дијаграма видети да се минималне вредности овог параметра постижу на 100% ($w_e = 0,56 \text{ kJ/dm}^3$) од оптерећења, а максималне на 50% ($w_e = 0,28 \text{ kJ/dm}^3$). Међутим, за разлику од претходног дијаграма, овде се за сваку криву могу написати једначине. Самим тим се може предвидети вредност овог параметра за било који број обртаја при референтним вредностима оптерећења. Једначине кривих са дијаграма су дате следећим релацијама.

Иван Грујић

$$w_e = 0,14 \text{ kJ/dm}^3 \quad \varphi_{z1}/\varphi_{z2} = 5 \cdot 10^{-8} \cdot n^2 - 0,0002 \cdot n + 0,3967 \quad (48)$$

$$w_e = 0,28 \text{ kJ/dm}^3 \quad \varphi_{z1}/\varphi_{z2} = 1 \cdot 10^{-8} \cdot n^2 - 4 \cdot 10^{-5} \cdot n + 0,174 \quad (49)$$

$$w_e = 0,42 \text{ kJ/dm}^3 \quad \varphi_{z1}/\varphi_{z2} = -7 \cdot 10^{-8} \cdot n^2 + 0,0003 \cdot n - 0,202 \quad (50)$$

$$w_e = 0,56 \text{ kJ/dm}^3 \quad \varphi_{z1}/\varphi_{z2} = 5 \cdot 10^{-8} \cdot n^2 - 0,0002 \cdot n + 0,4008 \quad (51)$$

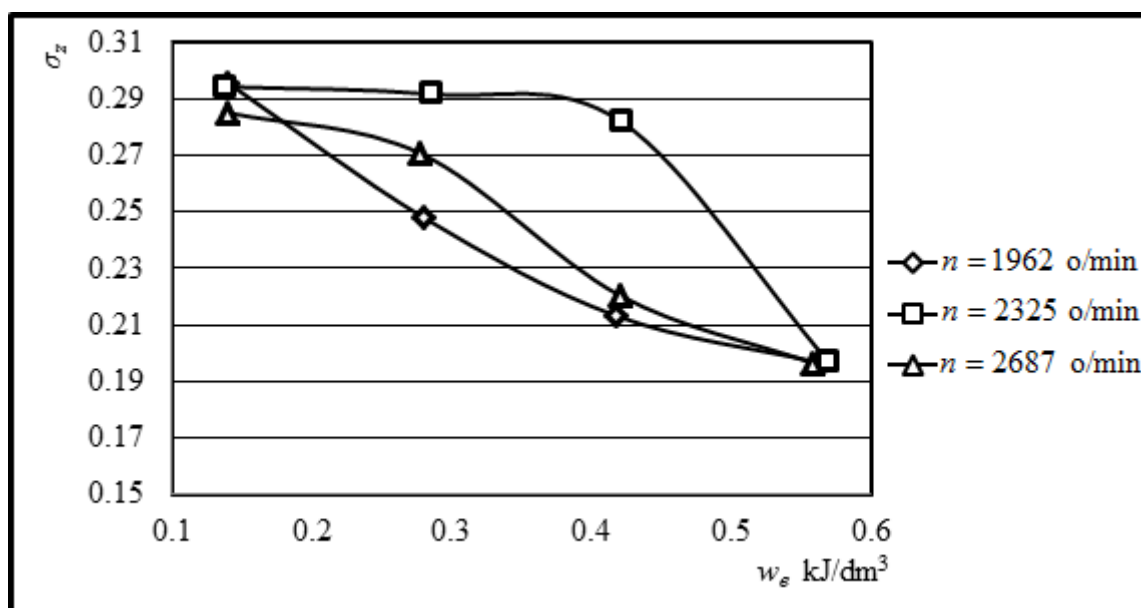
4.4 Удео сагорелог горива током првог дела Vibe функције

Вредности овог параметра се могу видети у табели 4.4.

Табела 4.4. Удео сагорелог горива током првог дела Vibe функције

w_e	$\sigma_z A$	$\sigma_z B$	$\sigma_z C$
$w_e = 0,14 \text{ kJ/dm}^3$	0.29562	0.29422	0.28506
$w_e = 0,28 \text{ kJ/dm}^3$	0.24797	0.29158	0.27058
$w_e = 0,42 \text{ kJ/dm}^3$	0.21312	0.28169	0.22047
$w_e = 0,56 \text{ kJ/dm}^3$	0.19627	0.19662	0.19649

Употребом података из табеле 4.4 може се нацртати дијаграм зависности овог параметра од оптерећења при различитим бројевима обртаја, (слика 4.7).



Слика 4.7. Удео сагорелог горива током првог дела Vibe функције у зависности од оптерећења, при различитим бројевима обртаја

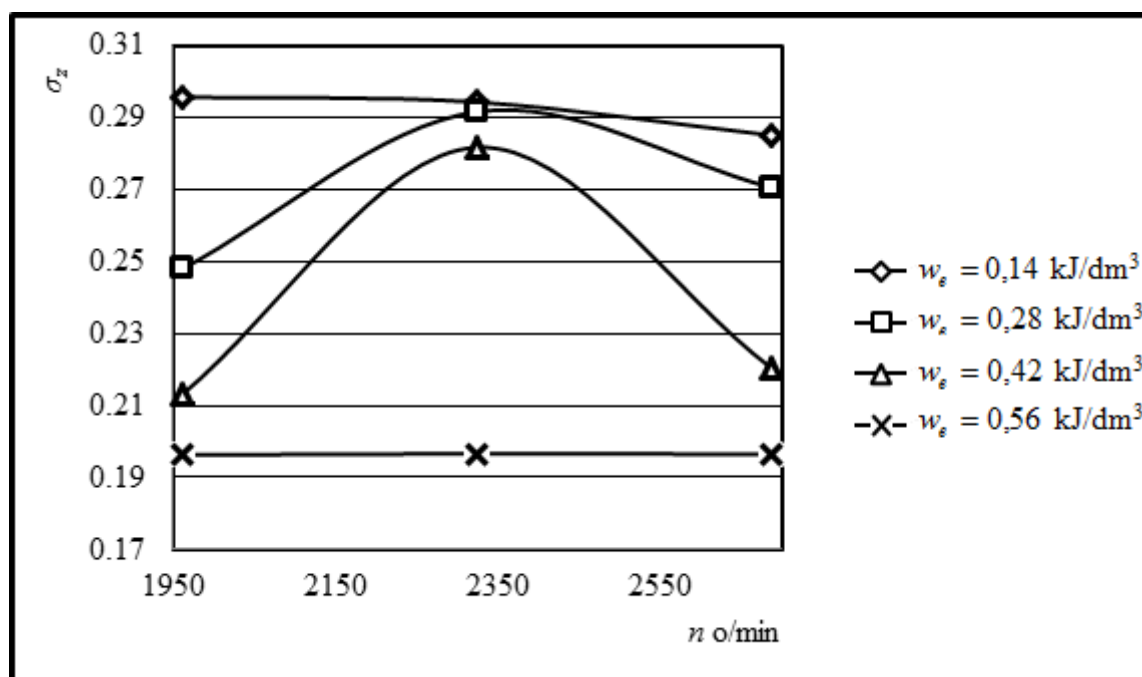
Анализирајући слику 4.7 може доћи до закључка да са порастом оптерећења, опада вредност овог параметра. Такође, због облика криви у великој мери се може предвидети вредност овог параметра за различите вредности оптерећења при референтним бројевима обртаја. Једначине које описују промену овог параметра су приказане следећим релацијама.

$$n = 1962 \text{ o} \cdot \text{min}^{-1} \quad \sigma_z = 0,4032 \cdot w_e^2 - 0,5194 \cdot w_e + 0,3608 \quad (52)$$

$$n = 2325 \text{ o} \cdot \text{min}^{-1} \quad \sigma_z = -0,9806 \cdot w_e^2 + 0,4821 \cdot w_e + 0,2434 \quad (53)$$

$$n = 2687 \text{ o} \cdot \text{min}^{-1} \quad \sigma_z = -0,1229 \cdot w_e^2 - 0,1407 \cdot w_e + 0,3102 \quad (54)$$

На основу података из табеле 6.4 се још може дијаграмски приказати зависност овог параметра од броја обртаја, при различитим вредностима оптерећења, приказано сликом 4.8.



Слика 4.8. Удео сагорелог горива током првог дела Vibe функције у зависности од бројева обртаја, при различитим оптерећењима

Нажалост када је у питању слика 4.8 није могуће рећи како број обртаја утиче на овај параметар. Ипак треба напоменути да се са дијаграма може уочити да се веће вредности овог параметра постижу при мањим оптерећењима и обрнуто, мање вредности параметра при већим оптерећењима. Добра стране је ипак што је могуће исписати једначине за криве да дијаграма на слици 4.8, те се може предвидети вредност овог параметра за неку другу вредност броја обртаја, при конкретним вредностима оптерећења. Поменуте једначине се могу видети на следећим релацијама.

Иван Грујић

$$w_e = 0,14 \text{ kJ/dm}^3 \quad \sigma_z = -1 \cdot 10^{-5} \cdot n + 0,3255 \quad (55)$$

$$w_e = 0,28 \text{ kJ/dm}^3 \quad \sigma = -2 \cdot 10^{-7} \cdot n^2 + 0,0012 \cdot n - 1,1086 \quad (56)$$

$$w_e = 0,42 \text{ kJ/dm}^3 \quad \sigma = -5 \cdot 10^{-7} \cdot n^2 + 0,0023 \cdot n - 2,4101 \quad (57)$$

$$w_e = 0,56 \text{ kJ/dm}^3 \quad \sigma_z = 3 \cdot 10^{-7} \cdot n + 0,1958 \quad (58)$$

Закључак

Двостепена Vibe функција се примењује за описивање закона сагоревања код дизел мотора, првенствено код дизел мотора са директним убризгавањем. Параметри Vibe функције су веома битни из тог разлога што сам облик функције зависи од њих. Тачније речено од вредности параметара зависи у коликој мери ће Vibe функција обухватити све тачке закона сагоревања.

Како би било могуће одређивања параметара Vibe функције за неки мотора, прво се мора извршити експеримент. Тачније речено, треба на конкретном типу мотора за који се ради одређивање параметара, извршити мерење одређених величина. На основу измерених вредности добијају се дискретне вредности закона сагоревања, како је раније приказано. Кроз добијене тачке треба провући криву. Крива која се провлачи кроз ове тачке представља Vibe-ову функцију. У коликој тачности ће крива захватити све тачке зависи од параметара.

Када се параметри Vibe функције одреде, могу се приказати дијаграмски у зависности од неке величине, те видети како та величина утиче на њих. Конкретно у овом раду извршена је анализа зависности параметара Vibe функције од оптерећења и броја обртаја.

Пожељно је да се на основу кривих које се добију дијаграмски, напишу једначине по којима се параметри мењају у зависности од одређене величине. У том случају може се извршити предикција, односно предвиђање вредности параметара и за друге вредности величина од којих зависе а не само за оне при којима је испитивање вршено.

На овај начин могу се добијати вредности параметра и при другим режимима рачунски, без потребе да се приступи експерименту. Самим тим штеди се време и смањују трошкови експеримента. Захваљујући овако добијеним параметрима може одредити облик Vibe функције и за друге режиме.

Суштина рада своди се на то, да уколико се буде производио неки мотор који би имао сличне карактеристике опитног мотора, могу се одредити параметри Vibe функције без додатних експеримената. На тај начин, било би познато како би се одвијао процес сагоревања у мотору.

У овом раду извршено је одређивање параметра двостепене Vibe функције на основу реалних експерименталних података. Истраживан је утицај оптерећења и броја обртаја на ове параметре.

Иста методологија се може користити ради истраживања утицаја особина горива, параметара убризгавања (угао предубризгавања, притисак отварања бризгача...) ...

Суштински допринос експерименталног одређивања параметара Vibe функције се огледа у побољшању прецизности термодинамичког прорачуна мотора СУС. Тиме се скраћује време развоја нових и усавршавање постојећих дизел мотора.

Литература

- [1] Puntigam, W., Harmann, T., Schierl, B., and Hager, J.: Thermal management simulations by compiling of different software packages to a comprehensive system. SAE paper 2005-01-2061, 2005.
- [2] Chortiza, Интернет адреса: <http://chort.square7.ch/Buch/WJanz12.pdf>, приступљено 26.04.2015.
- [3] J I Ghojel: Review of the development and applications of the Wiebe function: a tribute to the contribution of Ivan Wiebe to engine research, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Monash University, Wellington Road, Clayton Victoria 3800, Melbourne, Australia, (2010), DOI: 10.1243/14680874JER06510.
- [4] Д. Радоњић, Р. Пешић: Топлотни прорачун мотора СУС , Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 1996.
- [5] Radivoje B. PEŠIĆ, Aleksandar Lj. DAVINIĆ, Dragan S. TARANOVIĆ, Danijela M. MILORADOVIĆ, Snežana D. PETKOVIĆ, **Experimental determination of double vibe function parameters in diesel engines with biodiesel**, Thermal Science, ISSN 0354-9836, vol. 14 (2010), No. Suppl., pp. 207-218, DOI:10.2298/TSCI100505069P.
- [6] Д. Радоњић: Предавања и вежбе из предмета Мотори СУС 2 на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу, 2013.
- [7] А. Давинић: Идентификација карактеристика мултипроцесног рада клипног мотора СУС, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2013.