

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство-стари наставни програм

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Моторна возила и мотори

Предмет: Конструкција и прорачун мотора СУС

Број индекса: 363/2011

Стефан З. Јанковић

**Истраживање погонских карактеристика
савремених мотора СУС применом симулационих
модела
мастер рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Драгољуб Радоњић, редовни професор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА
Сестре Јањић 6, 34000 Крагујевац



Катедра за моторна возила и моторе

МАСТЕР РАД

за кандидата: Стефана Јанковића бр. индекса: 363/2011

Тема: ИСТРАЖИВАЊЕ ПОГОНСКИХ КАРАКТЕРИСТИКА САВРЕМЕНИХ
МОТОРА СУС ПРИМЕНОМ СИМУЛАЦИОНИХ МОДЕЛА

Тезе:

1. Анализа погонских карактеристика мотора СУС за путничка возила по критеријуму захтеваних перформанси возила
2. Поступци и методе одређивања погонских карактеристика мотора СУС
3. Дефинисање симулационих модела за моделирање погонских карактеристика мотора СУС у стационарним и нестационарним режимима рада
4. Верификација модела коришћењем снимљених вредности на пробном столу и карактеристика мотора савремених путничких возила
5. Могућности примене модела на моделирање карактеристика најновијих мотора за путничка возила
6. Правци даљег развоја у овој области
7. Закључци

Крагујевац,
22. 05. 2013. год.

Предметни наставник за Моторе СУС,

Проф. др Драгољуб Радоњић

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да обради следеће:

- Анализа погонских карактеристика мотора СУС за путничка возила по критеријуму захтеваних перформанси возила
- Поступци и методе одређивања погонских карактеристика мотора СУС
- Дефинисање симулационих модела за моделирање погонских карактеристика мотора СУС у стационарним и нестационарним режимима рада
- Верификација модела коришћењем снимљених вредности на пробном столу и карактеристика мотора савремених путничких возила
- Могућности примене модела на моделирање карактеристика најновијих мотора за путничка возила
- Правци даљег развоја у овој области
- Закључци

Препоручена литература:

[1] Д. Радоњић, Р. Пешић, Топлотни прорачун мотора СУС, Машински факултет у Крагујевцу 1996., књига од 171 страна

[2] Mobiliti&Vehicle Mechanics, Volume 36, Number 1, March 2010, Editors: Prof. dr A. Janković, Prof. dr Č. Duboka , Facultz of Mechanical Engineering in Kragujevac 2010.

[3] Пакет програма MatLab

Крагујевац, датум

Ментор:

Име, презиме и звање ментора

Проф. др Драгољуб Радоњић

Резиме рада: Завршни рад је посвећен истраживању погонских карактеристика савремених мотора СУС применом симулационих модела. Поред основних разматрања погонских карактеристика, као и начине њихових представљања, у раду је дат и приказ и симулационих модела са својим излазним параметрима. Дато је упоређивање добијених симулационих излазних параметрима са параметрима на пробном столу, као и верификовање датог модела са стварним подацима реалних мотора са унутрашњим сагоревањем.

Кључне речи: Погонске карактеристике мотора, брзинске карактеристике возила, симулациони модел мотора са унутрашњим сагоревањем, софтверски пакет MatLab.

Summary of work: The final paper was to explore the driving characteristics of modern internal combustion engines using simulation models. Besides basic considerations driving characteristics, and ways of introducing, in the paper and the presentation and simulation models of their output parameters. Given upoređivanje obtained simulation output parameters with the parameters of the test stand, and the verification of this model with the actual data of real internal combustion engine.

Keywords: motor characteristics, characteristics of the vehicle speed, the simulation model of the internal combustion engine, a software package MatLab.

САДРЖАЈ:

1. Увод.....	7
2. Поступци и методе одређивања погонских карактеристика мотора СУС.....	9
2.1. Аналитички метод.....	9
2.2. Емпиријски метод.....	10
2.3. Експериментални метод.....	13
3. Дефинисање симулационих модела за моделирање погонских карактеристика мотора СУС у стационарним и нестационарним режимима рада.....	18
4. Верификација модела коришћењем снимљених вредности на пробном столу и карактеристика новијих мотора за путничка возила	32
5. Могућност примене модела на моделирање карактеристика новијих мотора за путничка возила	43
6. Правци даљег развоја у овој области	45
7. Закључци.....	47
8. Литература.....	48

1. Увод

Погонске карактеристике мотора који се користе у моторним возилима карактерише низ различитих особина, од којих су најважније:

- снага и обртни момент: максималне вредности и брзинска карактеристика
- потреба за трансмисијом
- димензије, маса
- начин складиштења погонске енергије и време допуњавања извора енергије
- карактеристике и расположивост погонског горива, начин добијања и складиштења
- поузданост, век трајања, погодност за одржавање
- удобност, бука, вибрације

За проучавање уздужне динамике возила, односно анализе могућности савладавања отпора кретања и енергије која је за то потребна, карактеристике од превасходног значаја су:

- брзинска карактеристика обртног момента M_e (Nm),
- брзинска карактеристика снаге P_e (kW),
- брзинска карактеристика специфичне ефективне потрошње горива g_e (g/kWh)

Обртни момент мотора се путем трансмисије, уз трансформације (промене вредности момента и броја обртаја) преноси до точка. Услед обртног момента на погонском точку, у контакту са подлогом долази до реализације вучне силе која се користи за савладавање отпора кретања. Стога је обртни момент мотора директна мера за величину отпора тј. радног оптерећења које возило може да савлада.

Снага коју мотор том приликом одаје, с обзиром на значење овог појма у механици, представља директну меру за брзину којом је тренутне отпоре могуће савладати. Зато снага представља меродаван параметар приликом оцењивања карактеристика мотора.

Параметри мотора немају константну вредност, већ се мењају са променом броја обртаја. Појам брзинске карактеристике мотора означава зависност неког његовог излазног параметра од броја обртаја. Другим речима, брзинска карактеристика нпр. обртног момента, подразумева познавање вредности обртног момента за било који број обртаја између минималног и максималног при ком мотор може да ради. Одавде следи да брзинска карактеристика представља криву функционалне зависности $M_e=f(n)$. Карактеристике мотора СУС се, у најосновнијој форми, по правилу приказују брзинским карактеристикама снаге P_e и обртног момента M_e . С обзиром да су момент и снага различите физичке величине, исказују се у различитим димензјама (Nm односно kW), за сваку од њих се на дијаграму користи засебна вертикална оса са одговарајућом размером.

Савремено моделирање незамисливо је без рачунара. У моделирању рачунари се користе у две сврхе: у развоју модела и у извођењу прорачуна на основу стварног модела (нпр. прорачуна понашања модела у времену код симулационих модела). На тај начин, моделирање помоћу рачунара постаје дисциплина којом се могу адекватно и ефикасно приказивати сложени системи и обликовати и испитивати њихово понашање. Израз моделирање и сумулација изражава сложену активност која укључује три елемента: реални систем, модел и рачунар.

Да би модел био користан, од суштинске је важности то да се за дати ограничени скуп његових описних променљивих, његово понашање може одредити на практичан начин: аналитички, нумерички или путем експеримента, где се за извесне, углавном случајне улазе, посматрају одговарајући излази. Овај последњи процес назива се симулација. Реч симулација у свакодневној употреби може да означивећи број различитих активности, као на пример: сложене видео игре, испитивање утицаја бројних фактора на лет нових модела авиона, део експеримента у социо-психолошким истраживањима итд. Када реч користе рачунарски стручњаци, организатори, менаџери или статистичари, обично под симулацијом подразумевају процес изградње апстрактних модела за неке системе или подсистеме реалног света и обављање већег броја експеримената над њима. Посебно нас интересује случај када се ти експерименти одвијају на рачунару. Тада говоримо о рачунарском моделирању и симулацији.

2. Поступци и методе одређивања погонских карактеристика мотора СУС

Поступци и методе одређивања погонских карактеристика могу се поделити у три групе[1]:

- Аналитички метод
- Емпиријски метод
- Експериментални метод

2.1. Аналитички метод

Аналитички метод се заснива на дефинисању погонских карактеристика мотора аналитичким изразима (једначинама) који се добијају математичким моделирањем радног циклуса мотора уз коришћење фундаменталних закона термодинамике и гасодинамике. У литератури је позната формула за одређивање екефтивне снаге мотора у облику [1]:

$$P_e = \frac{k * p_e * V_{hu} * n}{\tau} [kW], \quad (1)$$

p_e - средњи ефективни притисак [bar],

V_{hu} - укупна радна запремина свих цилиндара мотора [m^3], $V_{hu} = i * V_h$, i - број цилиндара, V_h - радна запремина једног цилиндра мотора,

n - број обртаја коленастог вратила мотора [$^o/s$],

τ - тактност мотора ($\tau=4$ за четворотактне, $\tau=2$ за двотактне моторе),

k - коефицијент (константа), чија вредност зависи од изабраних јединица појединих величина. Укупно си наведене величине у јединицама вредности коефицијента k износи: 200.

Овај израз дефинише брзинску карактеристику по снази мотора јер даје зависност снаге по броју обртаја мотора: $P_e = f(n)$.

У једначини (1), мешђутим и величина p_e зависи од броја обртаја мотора што се може видети из следећег израза:

$$p_e = \frac{H_d}{L_o} * \frac{\eta_i}{\lambda} * \eta_v * \eta_m * \rho_v, \quad (2)$$

где су:

H_d - доња топлотна моћ коришћеног горива,

L_o - теоријски потребна (минимална) количина ваздуха за потпуно сагоревање јединичне количине горива,

η_i - индикаторски степен искоришћења,

λ - коефицијент састава смеше,

η_v - степен пуњења,

η_m - механички степен искоришћења,

ρ_v - густина свеже радне материје (ваздуха).

Имајући у виду да величине у једначини (2), (η_v, η_i, η_m), зависе од броја обртаја мотора n и да је та зависност сложена, аналитички метод није погодан за дефинисање брзинских карактеристика мотора, па се у ту сврху и не користи.

2.2. Емпиријски метод

Емпиријски метод одређивања брзинских карактеристика мотора је чешће у примени због своје једноставности и практичности. Постоје више емпиријских и полуемпиријских формула од различитих аутора које се односе на различите врсте мотора. Једна од најчешће коришћених за возилске motore је формула Liderman-а за снагу и обртни момент мотора [1, 2]:

$$P_e = a * \omega^3 + b * \omega^2 + c * \omega * d, \quad (1)$$

израз за снагу мотора.

$$M_e = a * \omega^2 + b * \omega + c, \quad (2)$$

израз за обртни момент.

Веза између обртног момента и снаге мотора може се изразити изразом:

$$M_e = P_e / \omega \quad (3)$$

$$\frac{dP_e}{d\omega} = \omega * \frac{dM_e}{d\omega} + M_e \quad (4)$$

Вредности коефицијената a , b , c и d које су дате у формулама, могу се дефинисати на основу услова валидних за карактеристичне тачке датог мотора. Потребни параметри за дефинисање коефицијената Liderman-ове формуле су максимални обртни момент мотора M_e , број обртаја мотора при максималном обртном моменту n_m , максимална снага мотора P_e , број обртаја мотора при максималној снази мотора n_p , коефицијенти еластичности по

броју обртаја $e_n = \frac{n_m}{n_p}$ и коефицијент еластичности по обртном моменту $e_m = \frac{M_{emax}}{M_e(n_p)}$.
 $M_e(n_p)$ представља обртни момент мотора при броју обртаја максималне снаге мотора.

$$\frac{dP_e}{d\omega} = 0 \Rightarrow P_e = P_{emax} \quad (5)$$

$$\frac{dM_e}{d\omega} = 0 \Rightarrow M_e = M_{emax} \quad (6)$$

Одређивање коефицијената у формули Lidermana [2]:

$$\frac{dM_e}{d\omega} = 0 \Rightarrow 2a\omega_M + b = 0 \quad (7)$$

$$\frac{dP_e}{d\omega} = 0 \Rightarrow 3a\omega_P^2 + 2b\omega_P + c = 0 \quad (8)$$

Из једнакости једначина (7) и (8), могу се написати формуле:

$$(7) \Rightarrow M_{emax} = a\omega_M^2 + b\omega_M + c \quad (9)$$

$$(8) \Rightarrow P_{emax} = a\omega_P^3 + b\omega_P^2 + c\omega_P + d \quad (10)$$

Из једначине број (7) може се извући једнакост за коефицијент b :

$$(7) \Rightarrow b = -2a\omega_M \quad (11)$$

Одакле следи да једначине (8), (9) и (10) имају следећи облик:

$$(8) \Rightarrow 3a\omega_P^2 - 4a\omega_M\omega_P + c = 0 \quad (12)$$

$$(9) \Rightarrow M_{emax} = a\omega_M^2 - 2a\omega_M^2 + c \quad (13)$$

$$(10) \Rightarrow P_{emax} = a\omega_P^3 - 2a\omega_P^2\omega_M + c\omega_P + d \quad (14)$$

Једначине (12), (13) и (14) се могу преуредити, где добијамо следећи облик:

$$(12) \Rightarrow a\omega_P(3a\omega_P - 4\omega_M) + c = 0 \quad (15)$$

$$(13) \Rightarrow M_{emax} = -a\omega_M^2 + c \quad (16)$$

$$(14) \Rightarrow P_{emax} = a\omega_P^2(\omega_P - 2\omega_M) + c\omega_P + d \quad (17)$$

Изједначавњем једначина (12) и (13), може се добити израз за коефицијент a :

$$(12) = (13) \Rightarrow a\omega_P(3a\omega_P - 4\omega_M) + a\omega_M^2 = -M_{emax} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow a = \frac{-M_{emax}}{\omega_p(3\omega_p - 4\omega_M) + a\omega_M^2} \quad (18)$$

Добијањем решења коефицијента a , могу се изразити и преостала 3 коефицијента b , c и d :

$$b = \frac{2\omega_M M_{emax}}{\omega_p(3\omega_p - 4\omega_M) + \omega_M^2} \quad (19)$$

$$c = M_{emax} - \frac{M_{emax} \omega_M^2}{\omega_p(3\omega_p - 4\omega_M) + \omega_M^2} \quad (20)$$

$$d = P_{emax} - [a\omega_p^2(\omega_p - 2\omega_M) + c\omega_p]$$

$$d = P_{emax} + \frac{M_{emax} \omega_p^2(\omega_p - 2\omega_M)}{\omega_p(3\omega_p - 4\omega_M) + \omega_M^2} - \omega_p M_{emax} \left(1 - \frac{\omega_M^2}{\omega_p(3\omega_p - 4\omega_M) + \omega_M^2}\right)$$

$$d = P_{emax} + \frac{M_{emax} [\omega_p^2(\omega_p - 2\omega_M) - \omega_p^2(3\omega_p - 4\omega_M)]}{\omega_p(3\omega_p - 4\omega_M) + \omega_M^2} \quad (21)$$

Уколико се угаона брзина снаге и обртног момента замене у једначинама добијамо коначне облике коефицијената Lidermanove једначине:

$$a = \frac{-M_{emax}}{(P_{emax} e_m)^2(1 - e_n)(3 - e_n)} \quad (22)$$

$$b = \frac{2e_n M_{emax}^2}{(P_{emax} e_m)(1 - e_n)(3 - e_n)} \quad (23)$$

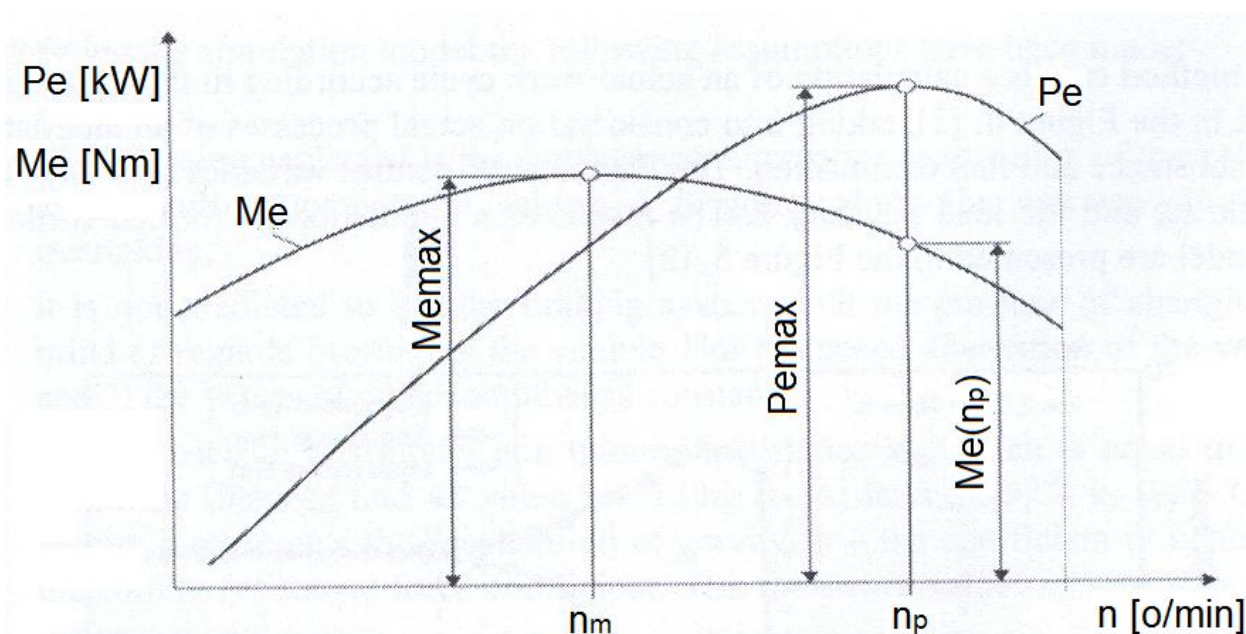
$$c = \frac{(3 - 4e_n)M_{emax}}{(1 - e_n)(3 - e_n)} \quad (24)$$

$$d = P_{emax} \left(1 + \frac{2e_m}{e_n - 3}\right) \quad (25)$$

Уколико се узме услов да је $d = 0$, што значи да је снага мотора P_e једнака нули, у условима када мотор не ради $p=0$. Одакле следи на је зависност коефицијената еластичности једнака:

$$e_M = 1.5 - 0.5 * e_n \quad (26)$$

Поред Lideman-а у литератури се срећу и формуле Лењина, које се користе за возилске моторе, и Хилстова-Муравјева (мотори за мотоцикле).

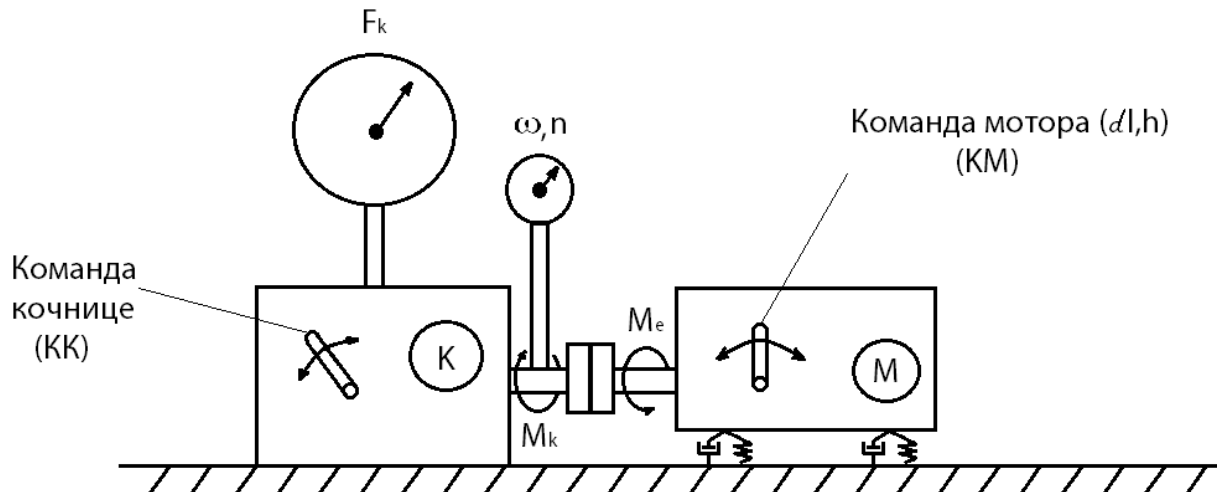


Слика 2.1. Брзинске карактеристике ото мотора и њихове карактеристичне тачке

2.3. Експериментални метод

Експериментални начин одређивања (снимања) брзинских карактеристика мотора је најчешћи у примени и за сада најпоузданији. Једини недостатак је што подразумева коришћење релативно скупе лабораторијске опреме и комплексног мерног поступка. У циљу унифицирања, донети су разни национални и међународни стандарди који прописују потребну мерну опрему, услове и поступак (метод) мерења: СРПС (бивши ЈУС) – домаћи, ДИН – немачки, ИСО – међународни, САЕ – амерички, СИА – француски КУНА – италијански и др [1].

Основу лабораторијског мерног уређаја за снимање карактеристика мотора чини пробни сто који се састоји од уређаја (кочнице) за симулирање оптерећења мотора и инструмената (давача) за мерење карактеристичних величина: силе, односно, момента кочења и угаоне брзине, односно, броја обртаја мотора.



Слика 2.2. Пробни сто за снимање карактеристика мотора СУС

Кочница (К) служи за оптерећење мотора, при чему се величина оптерећења (вредност силе кочења F_k , односно момента M_k), мења помоћу командне полуге кочнице КК.

Кочнице могу бити: механичке (са кочионим папучама или траком), хидрауличне, пнеуматске и електричне. Осим што се разликују по принципу рада (кочења), оне имају и различите карактеристике момента и снаге кочења па отуда и различито понашање у погледу стабилности рада система мотор-кочница. По том критеријуму редослед је следећи: хидрауличне и пнеуматске су најповољније, па затим електричне и на крају механичке [1].

За снимање снаге као брзинске карактеристике, пробни сто мора бити опремљен инструментима за мерење силе кочења (мерна вага или давач силе) и броја обртаја (обртомер).

Поступак снимања снаге мотора на пробном столу

Помоћу команди мотора (КМ) и кочнице (КК), зада се жељени режим рада мотора при чему се одговарајуће вредности силе кочења F_k и броја обртаја n прате на мерној скали ваге, односно, на обртомеру. Када се постигне устаљен режим рада ($F_k, n = \text{const}$), тада према динамичкој једначини обртања следи [3]:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_e - M_k, n = \text{const.} \Rightarrow \omega = \text{const.} \Rightarrow \frac{d\omega}{dt} = 0 \Rightarrow M_e = M_k$$

Последња једнакост указује на то да је за одређивање обртног момента мотора M_e , потребно одредити момент кочења M_k . Момент M_k се рачуна као производ силе кочења F_k , чија се вредност за дати режим рада читава са скале мерне ваге и дужине полуге L која спаја кочницу са мерном вагом:

$$M_k = F_k L = M_e$$

Снага мотора се одређује из познате формуле:

$$P_e = M_e \omega = 2\pi L F_k$$

Вредност дужине полуге L се бира конструктивно тако да коефицијент $2\pi L$ у формули за снагу има погодну вредност за прорачун. За уобичајене јединице основних величина: P_e [kW], F_k [N], n [o/min], усваја се $L=980$ mm, тако да се добија израз за рачунање снаге у следећем облику:

$$P_e = \frac{F_k n}{1000} \text{ [kW]}$$

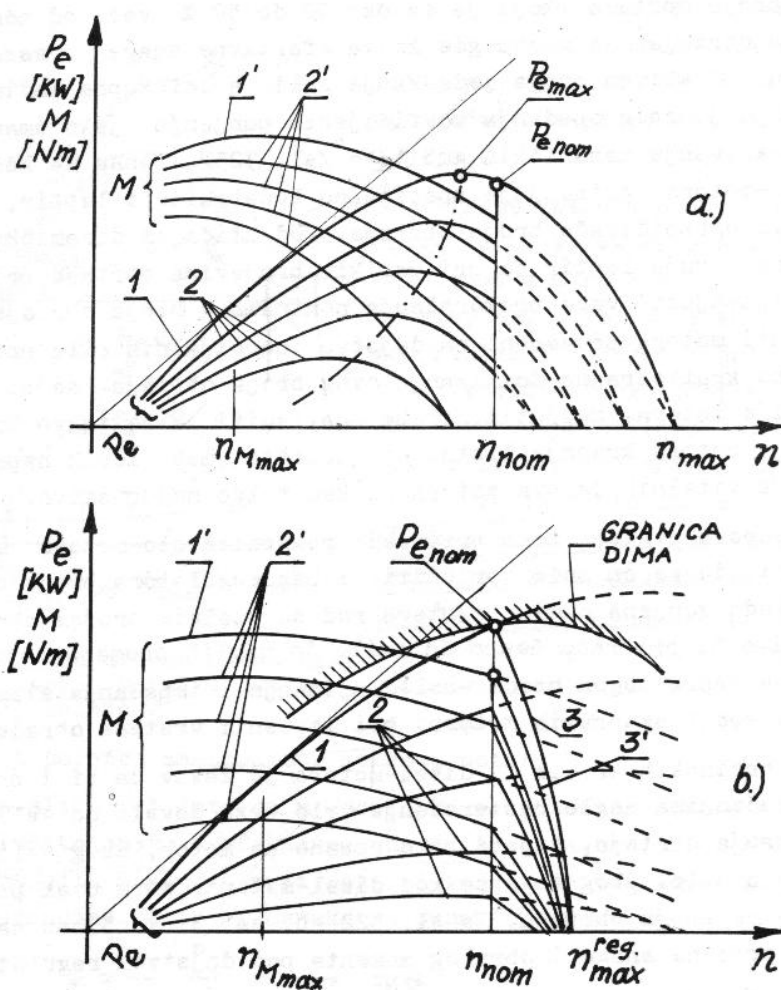
Као што је раније речено, брзинске карактеристике се добијају при константном положају команде мотора (КМ): $\alpha_L = \text{const.}$ или $h = \text{const.}$ Ако се са тим условом понови горњи поступак за различите бројеве обртаја од $n_{\min}$ до $n_{\max}$, добићемо скуп вредности за M_e и P_e које у координатном систему $(M_e, P_e) = f(n)$ дефинишу криве брзинских карактеристика мотора по обртном моменту, односно, снази мотора. У овом случају је јасно да ће се промена режима рада мотора, односно броја обртаја n , вршити само командом кочнице (КК) [3].

Ако се снимање обави при максималном положају команде мотора ($\alpha_L=100\%$, $h=100\%$), тако добијене карактеристике представљају спољашње брзинске карактеристике мотора. У свим осталим случајевима ($\alpha_L < 100\%$, $h < 100\%$), добијају се парцијалне брзинске карактеристике.

Брзинске карактеристике карбураторског ото мотора. Карактеришу се израженим максимумом и великом закривљеношћу што је последица количинске регулације помоћу пригушног лептира. Нагли пад степена пуњења при бројевима обртаја $n > n_p$ доводи до обарања снаге мотора због чега ови мотори не захтевају примену регулатора који ограничава максимални број обртаја. Максимуми снаге, односно обртног момента парцијалних кривих, леже кривима чији је облик дефинисан аналитичким зависностима: $(P_{\max})_i = f(n)$, односно, $(M_{\max})_i = f(n)$.

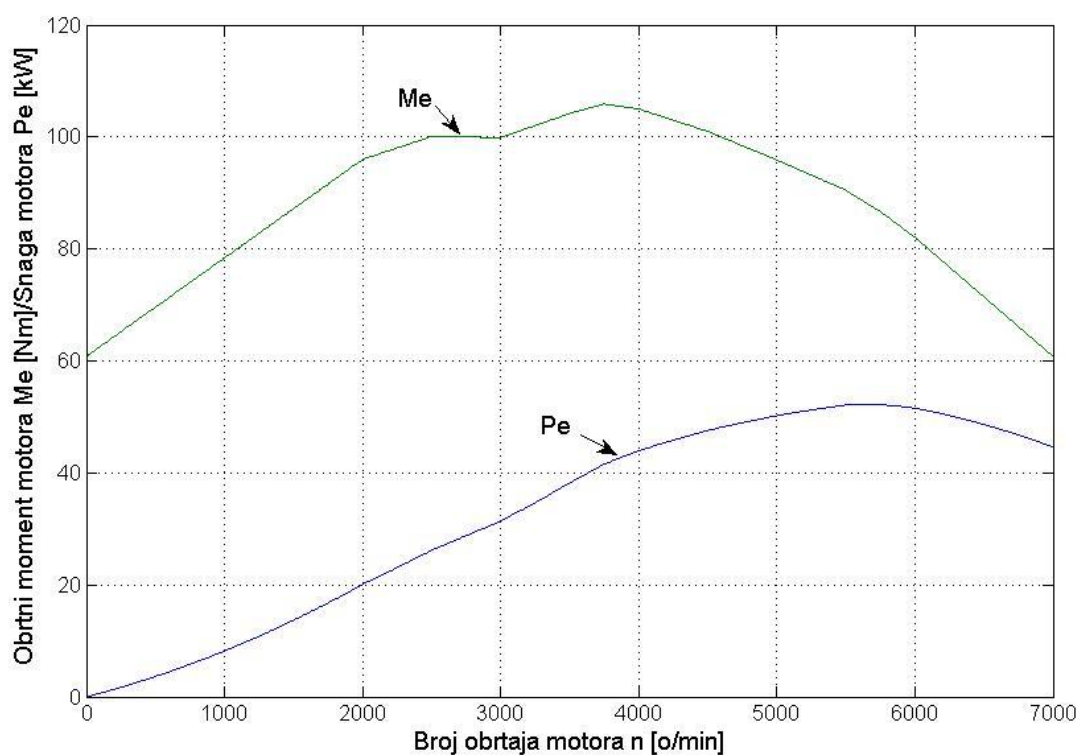
Код дизел мотора се користи квалитативна регулација промене количине горива у условима мањих промена степена пуњења што за последицу има следеће појаве:

- криве брзинских карактеристика су мање закривљене,
- неопходна је примена регулатора који ограничава максимална број обртаја ($n_{\text{reg}} \approx n_{\max}$),
- спољашња брзинска карактеристика није једнозначно дефинисана већ постоје карактеристике: на граници дима ($P_{\text{egr.dima}}$) и максималне снаге ($P_{\max}$), које нису трајне снаге и номиналне снаге (P_{enom}) која је трајна снага.



Слика 2.3. Промена брзинске карактеристике ото (а) и дизел (б) мотора 1,2 - крива пуне и парцијалне снаге 1', 2' - крива обртног момента-пуно и парцијално оптерећење 3, 3' - крива снаге и момента под дејством регулатора броја обртаја

Приказ експерименталних података за мотор Yugo Florida 1.4l, дати су на слици 2.4. Где се може запазити да криве снаге и обртног момента одступају од неких идеалних криви, што је и нормално собзиром да се ради о реалним условима.

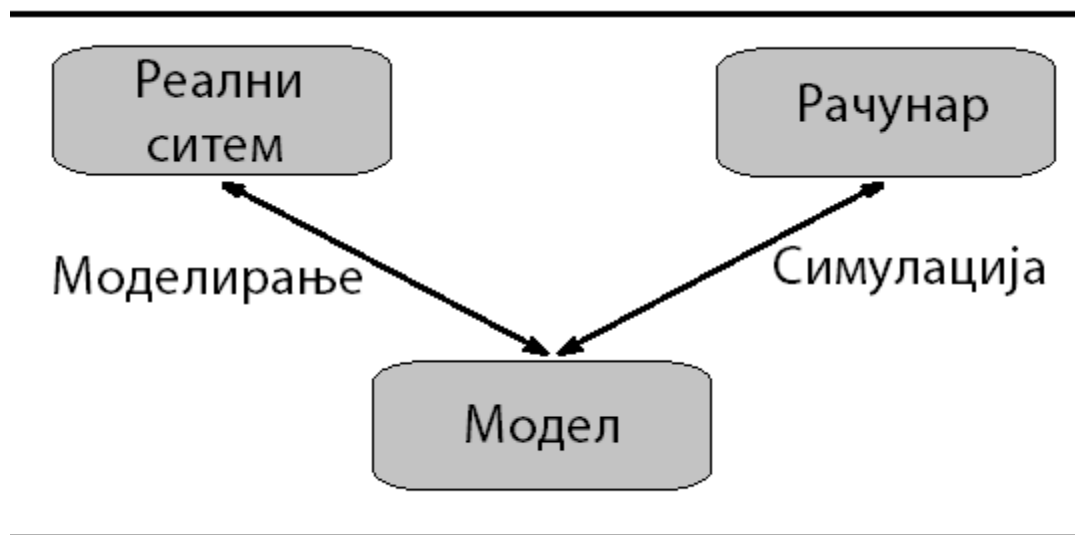


Слика 2.4. Пример експерименталних података за мотор 1.4l Yugo Florida [4]

3. Дефинисање симулационих модела за моделирање погонских карактеристика мотора СУС у стационарним и нестационарним режимима рада

Савремено моделирање незамисливо је без рачунара. У моделирању рачунари се користе у две сврхе: у развоју модела и у извођењу прорачуна на основу стварног модела (нпр. прорачуна понашања модела у времену код симулационих модела). На тај начин, моделирање помоћу рачунара постаје дисциплина којом се могу адекватно и ефикасно приказивати сложени системи и обликовати и испитивати њихово понашање [5].

Израз моделирање и сумулација изражава сложену активност која укључује три елемента: реалнисистем, модел и рачунар. Ова се активност на упрошћен начин може представити дијаграмом на слици 3.1.



Слика 3.1. Релације моделирања и симулације

Под реалним системом подразумевамо уређен, међузависан скуп елемената који формирају јединствену целину и делују заједнички како би остварили задати циљ или функцију, без обзира да ли се ради о природном или вештачком систему, и такође, без обзира да ли тај систем у посматраном тренутку постоји или се његово постојање планира у будућности. Реални систем је извор података о понашању, а ови се подаци јављају у облику зависности $X(t)$, где је X било која променљива која интересује истраживача, а (t) је време мерено у одговарајућим јединицама. Другим речима реални систем се може посматрати као извор података за спецификацију модела [5].

Модел, као и сваки реални систем, има своје објекте који се описују атрибутима или променљивим. Он је апстрактни приказ система и даје његову структуру, његове

компоненте и њихово узајамно деловање. С обзиром да се за симулацију најчешће користи рачунар (разматрамо само тај случај), то се под моделом може подразумевати скуп инструкција (програм) који служи да се генерише понашање симулираног система (временска серија вредности променљивих симулираног система). Понашање модела не мора да буде у потпуности једнако понашању симулираног система, већ само у оном домену који је од интереса.

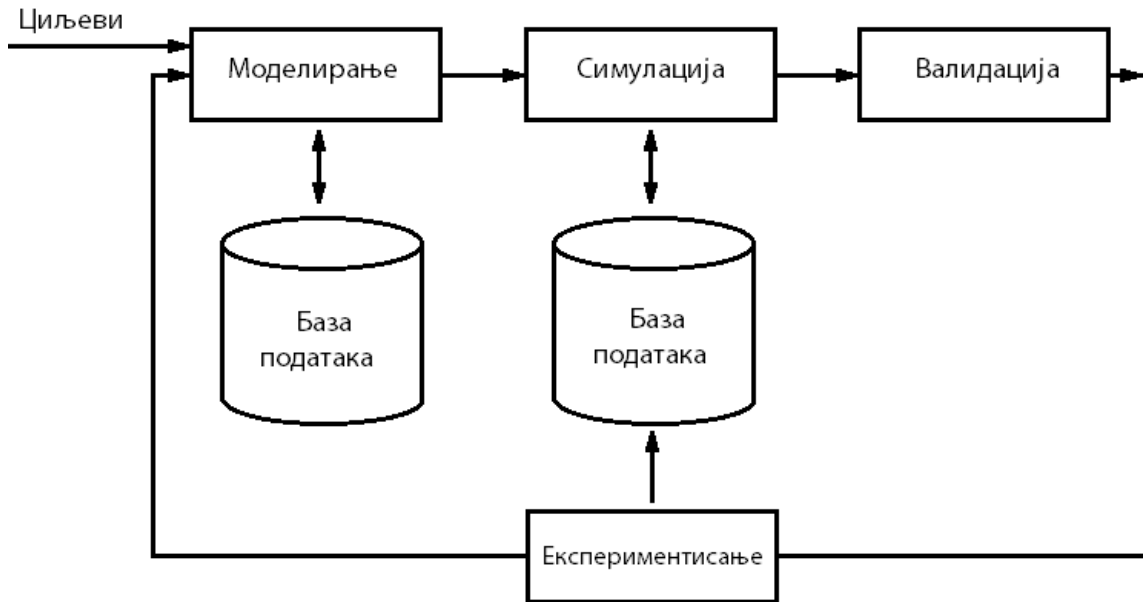
Рачунар као трећа компонента ове активности, представља уређај способан за извршење инструкција модела, које на бази улазних података генеришу развој модела у времену. Рачунари, уз различите методе и програмске алате, омогућавају погодан амбијент за стварање сложених модела иефикасан рад над њима.

Међутим, поред ових елемената, пажњу треба усмерити и на откривање и дефинисање релација које постоје између њих. Моделирање је процес којим се успоставља веза између реалног система и модела, док је симулација процес који успоставља релацију између модела и рачунара [5].

Релација моделирања односи се на валидност модела. Валидност или ваљаност модела описује колико верно један моделе представља симулирани систем. Процес утврђивања степена слагања података о реалном систему са подацима модела назива се валидација модела. Процес валидације је веома значајан, јер се на основу њега доносе одлуке о употребљивости резултата симулације, измени модела, измени података (улазних променљивих, параметара), даљем наставку симулације, понављању симулације, итд.

Релација симулације односи се на проверу да ли симулациони програм верно преноси модел на рачунар као и на тачност којом рачунар извршава инструкције модела. Пре поређења стварних података са подацима које генерише рачунар (симулатор), мора се утврдити тачност, односно коректност симулатора. Процес процене коректности симулатора назива се верификација.

На слици 3.2, приказане су активности процеса моделирања и симулације са базом модела као централним објектом. Процесом моделирања се управља на основу циљева који се генеришу ван граница система. Сваки нови циљ иницира активност синтезе модела. При синтези модела се користи расположиво знање из базе модела и базе података. Ове базе чувају и организују прикупљене податке о реалном систему. Фазе симулације (експериментисање са моделом) и валидације следе фазу изградње модела [5].



Слика 3.2. Процес моделирања и симулације

Може се поставити питање због чега се уопште један систем (симулирани систем) замењује моделом, а затим врши симулација. Постоји више разлога, али су најважнији следећи [5]:

- Експеримент над реалним системом може да буде скуп или чак немогућ (на пример, у економским системима или хемијским постројењима).
- Аналитички модел нема аналитичко решење (нпр., сложенији модели масовног опслуживања)
- Систем може да буде сувише сложен да би се описао аналитички (на пример, системом диференцијалних једначина).

Поред ових, навешћемо још неколико значајних разлога [5]:

- Експериментисање са реланим системом, чак и ако се занемаре други аспекти, углавном је неисплативо или сувише сложено. Моделирање, с друге стране, може да укаже на то да ли је даље улагање у експеримент економски оправдано или не.
- Изградња модела и симулација понекад имају за циљ да се схвати функционисање постојећег система чија је структура непозната и не може јој се прићи.
- Приликом изналажења оптималног функционисања неког система, уобичајено је да се мењају разни параметри. Често је то неизводљиво са реланим системом, било зато што таквог система уопште нема (тек га треба градити) или зато што би такав експеримент био прескуп. Тада суградња модела и његова симулација могуће решење.

- Понекад треба симулирати услове под којим наступа разарање система. Наравно, разарање реалног система најчешће није допустиво. У таквим приликама, симулација представља право решење.
- Време може да буде врло јак разлог да се прибегне симулацији. При симулацији, време се може сажети. То је значајно код симулације дуготрајних процеса. У другим случајевим, време се може знатно продужити. На пример, са циљем да се прати постепено одвијање врло брзих процеса, што у реалном систему није могуће.
- Када се врши реални експеримент, увек постоји извесна грешка при мерењу услед несавршености мерних уређаја. При симулацији ове грешке нема. Постоји само грешка заокруживања услед коначне дужине речи у рачунару, али се она са мало труда може учинити занемарљивом.

Постоје велике могућности модерних рачунара, снижење трошкова по операцији, напредак у методологији симулације и њено профилисање као засебне научне дисциплине, затим савремени, уско специјализовани симулациони језици, значајно су проширили подручје примене симулације. Питање које из тога приистиче, односи се на могућност примене симулације. Навешћемо неколико ситуација када се симулација може успешно применити:

- Симулација омогућава проучавање и експериментисање које узима у обзир све укупне интеракције сложеног система или подсистема унутар сложеног система.
- Информационе и организационе промене или промене у окружењу могу се симулирати, а уједно се могу посматрати ефекти тих промена на понашање модела.
- Знање стечено у процесу изградње модела и симулације може бити од великог значаја код побољшања система који се испитује.
- Мењањем симулационих улаза и посматрањем резултујућих излаза, долазимо до важног сазнања о томе које су променљиве система најважније и како променљиве утичу једна на другу.
- Симулација се може користити за експериментисање са новим концепцијама или политикама пре него што се изврши њихова имплементација.
- Симулација се може користити за верификацију аналитичких решења

Бављење симулационим методама и техникама захтева, између осталог, и познавање њених предности и недостатака. Као основне предности коришћења симулације наводе се следеће [5]:

- Једном изграђени модел може се вишеструко користити за анализу предложених планова или политика.
- Симулационе методе могу се користити као помоћ код анализе, чак иако су улазни подаци на неки начин непотпуни.

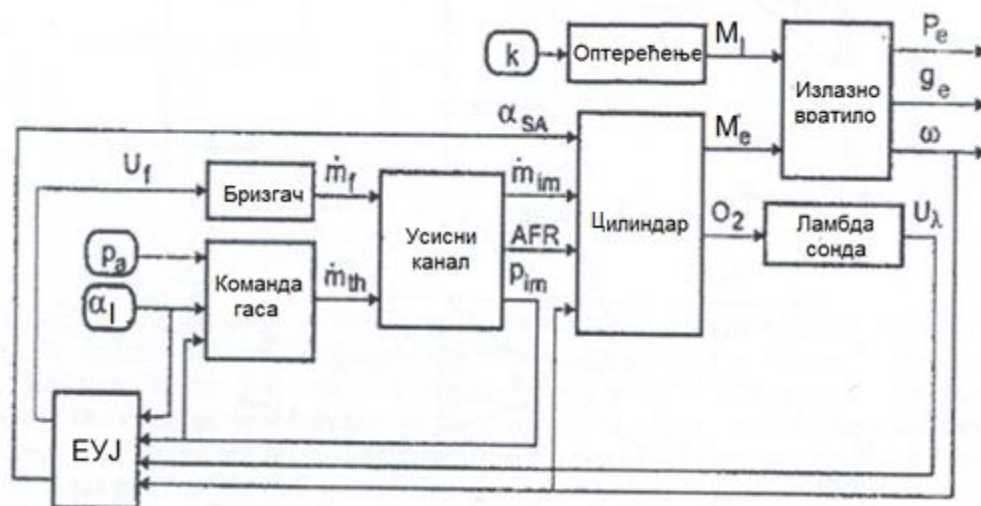
- Чест је случај да се симулациони подаци могу много јефтиније добити од сличних података из реалног система.
- Симулационе методе лакше је применити него аналитичке методе. Стога је круг потенцијалних корисника симулационих метода знатно шири.
- Аналитички модели углавном захтевају више поједностављујућих претпоставки које их чине математички прилагодљивим. Симулациони модели таква ограничења немају. Са аналитичким моделима, најчешће се може израчунати једино ограничени број мерљивих карактеристика система, док код симулационих модела генерисани подаци могу да се користе за процену било које схватљиве мерљиве карактеристике.
- У неким случајевима, симулација је једино средство за решавање одговарајућег проблема.
- Могуће је описати и решавати сложене динамичке проблеме са случајним променљивим који су недоступни математичком моделирању.

У основне недостатке коришћења симулације убрајају се следећи:

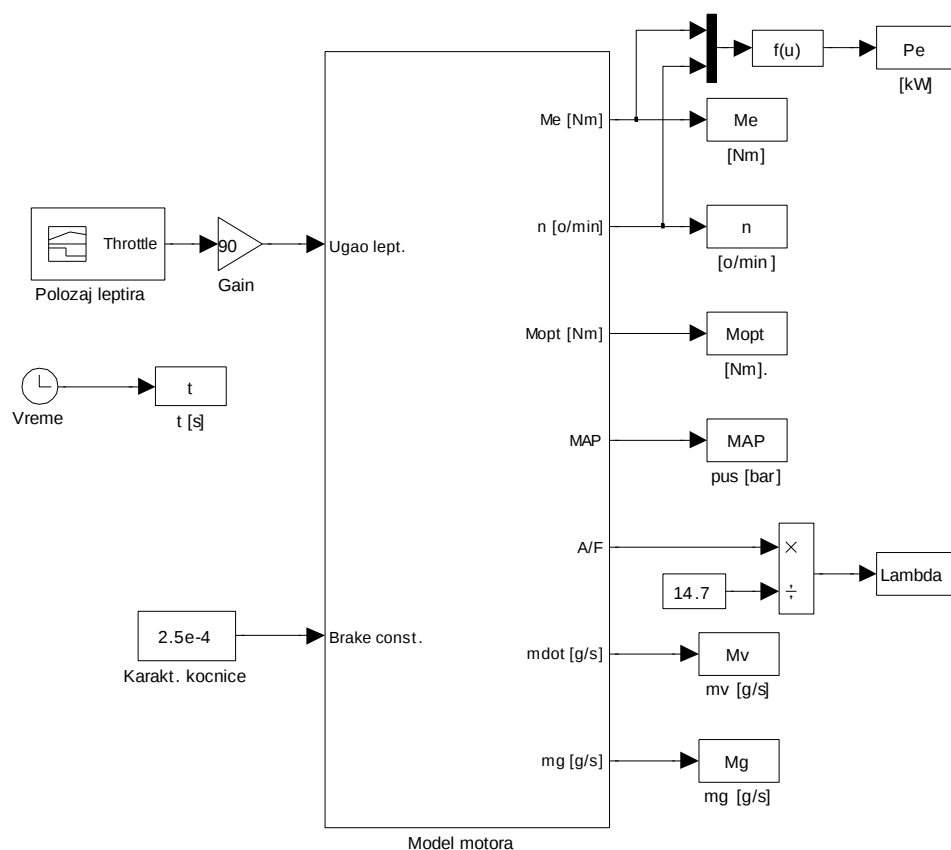
- Симулациони модели за дигиталне рачунаре могу бити скупи и могу захтевати значајно време за изградњу и валидацију.
- Због статистичког карактера симулације потребно је извођење већег броја симулационих експеримената како би се добио одговарајући узорак резултата симулације, а већ и појединачно извођење експеримента може захтевати доста времена и меморије рачунара.
- Не добијају се зависности излазних променљивих од улазних променљивих модела нити оптимална решења.
- За исправно коришћење симулационог моделирања потребно је познавање различитих метода и алата

Мотори као погонска јединица моторних возила, раде у веома варијабилним операцијама које се требају моделирати. Измоделиране погонске карактеристике мотора које су дефинисане и одређене за статички режим рада не могу се испитивати користити за моторе који имају нестационарни режим рада. Дакле, оно што је потребно је да се формира модел мотора који је ће да створи основне вредности мотора (снага и обртни момент), за различите режиме рада мотора, на пример, кога што је време потребно за претицање возила приликом убрзавања возила. За изградњу таквог модела потребно је користити следећа два приступа:

- Модел заснован на израчунавању циклуса у различитим режимима рада
- Модел заснован на примени емпиријске и полу-емпиријске формуле



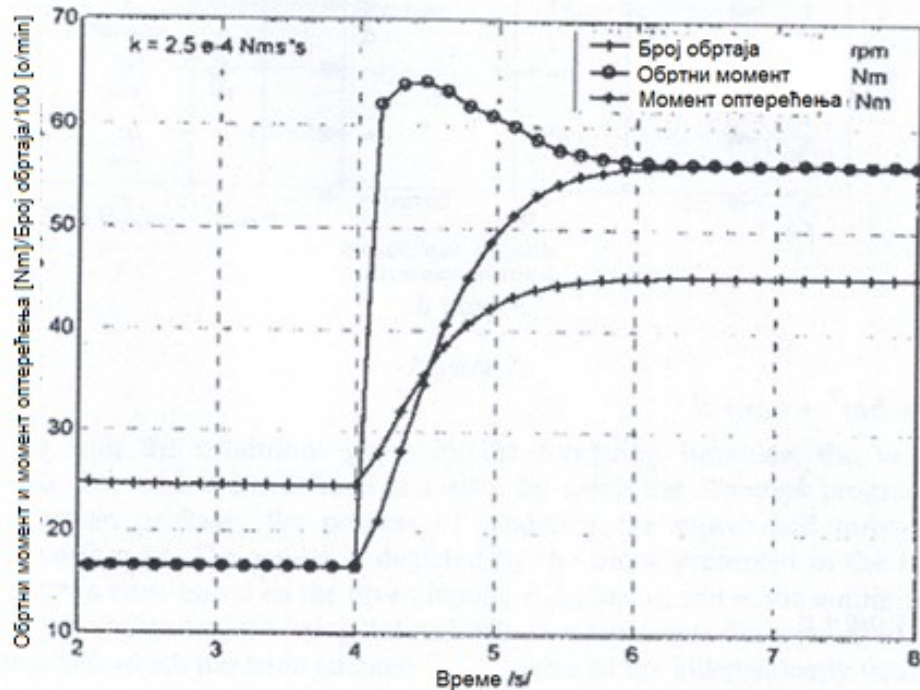
Слика 3.3. Блок дијаграм за симулацију погонских карактеристика мотора СУС у променљивим режимима рада [2]



Слика 3.4. Блок дијаграм програма у Simulink-у према слици 3.3. [4]

Прва метода подразумева прорачунавање стварног циклуса према представљеном блок дијаграму на слици 3.3., узимајући у обзир стварне процесе за измену радне материје и сагоревање горива. Основне контролне променљиве су:

- положај гаса α_l
- интензитет оптерећења k .



Слика 3.5. Излазне вредности [2]

Резултати симулације за коришћење оваквог модела приказани су на слици 3.4. Приликом снимања излазних величина коришћена је степ функција отварања лептира гаса или полулица код дизел мотора, од 20% до 60%, при чему је коришћено оптерећење кочнице од $2.5e-4 \text{ Nms}^2$ [2].

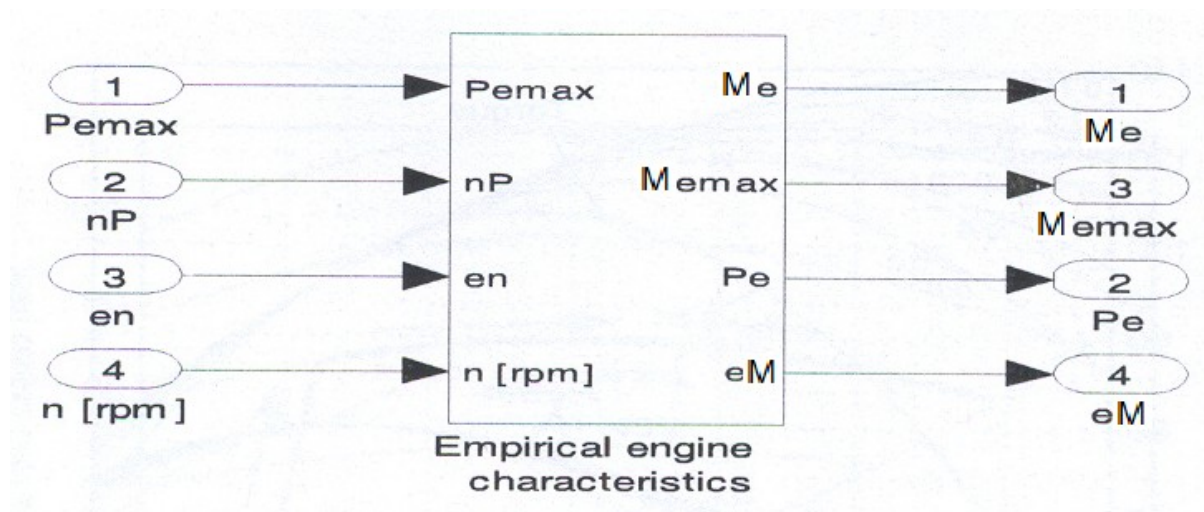
На слици 3.5., се може видети да у једном делу обртни момент мотора није исти као и обртни момент оптерећења кочнице, што говори да је мотор био у нестационарном режиму све до изједначења обртних момената, управо тај нестационарни режим је потребан да би дато возило могло извршити операцију убрзања возила, као и остале операције као што је претицање другог возила.

Други метод за израчунавање брзинских карактеристика мотора подразумева коришћење емпиријских формула за снагу и обртни момент мотора. Најчешће коришћена емпиријска формула је формула трећег степена за израчунавање снаге мотора, на основу које можемо из познате релације да израчунамо обртни момент мотора, на основу чега може се добити следећа формула за обртни момент, о чему је било речи у ранијем тексту.

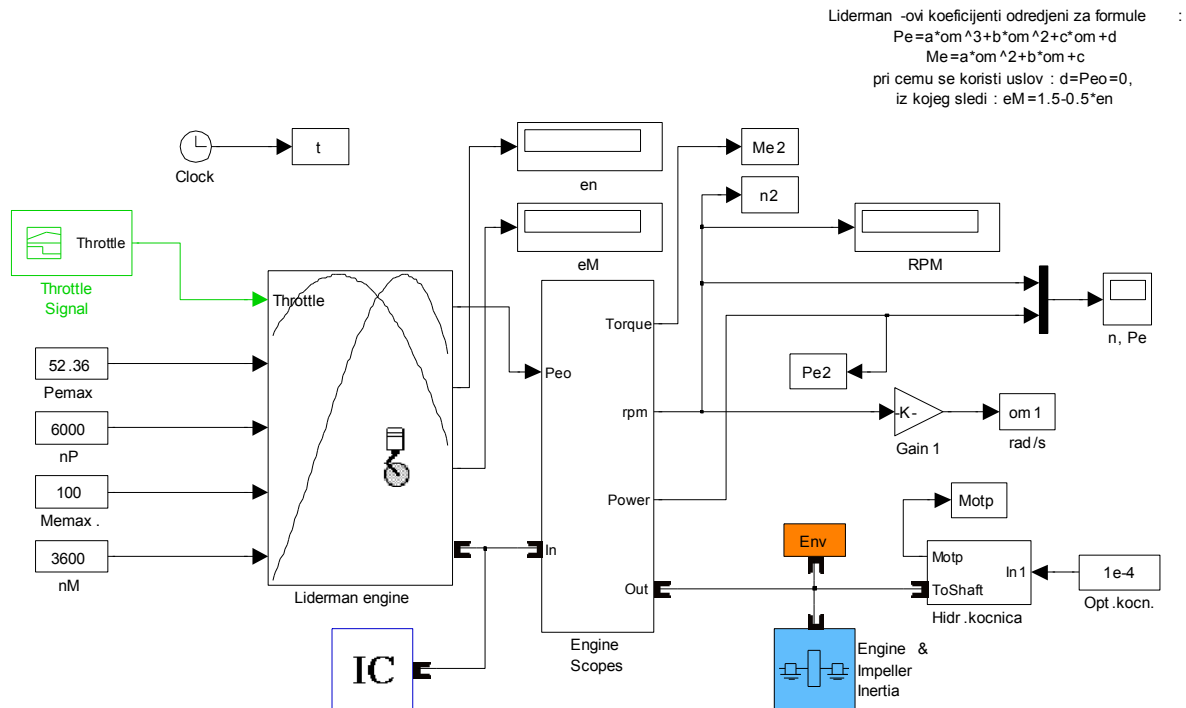
Вредности коефицијената a , b , c и d у формулама су одређена на основу услова за дате карактеристичне тачке. Карактеристичне тачке представљају максимална снага мотора, максимални обртни момент, број обртаја при максималној снази, број обртаја при максималном обртном моменту и обртни момент за број обртаја максималне снаге мотора.

Облик крива снаге мотора и обртног момента зависи од коефицијената еластичности e_n и e_m .

За дефинисање симулационих модела користиће се програмски пакет Simulink Matlab, где се могу приказати модели на основу емпиријских формула Liderman-а као на сликама, 3.6., 3.7.



Слика 3.6. Симулациони модел на основу емпиријске формуле [2]



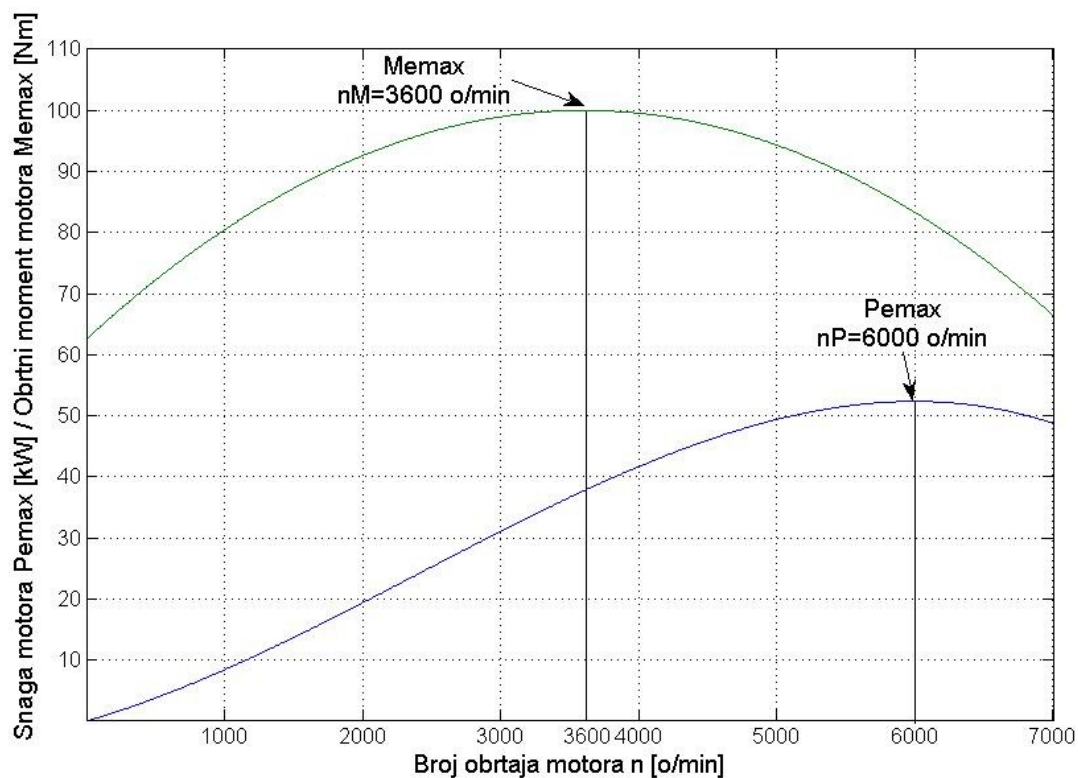
Слика 3.7. Симулациони модел за стационарне режиме мотора [4, 5, 6]

Коришћењем оваквих симулационих модела погодно је за разноразне операције снимања карактеристика као и параметара мотора, што ће бити представљено у даљем тексту. Излазни подаци из модела су број обртаја n , снага мотора Pe , обртни момент мотора Me , коефицијенти еластичности e_n и eM , стим што коефицијенти еластичности су програмирани тако да када се пусти модел у рад, тј. прорачунавање подаци коефицијената су исписани на дисплеју самог модела. Излазне податке можемо варирати и у функцији од отворености лептира мотора, где можемо видети снагу мотора у односу на задату вредност отворености лептира гаса. Коришћењем овог модела можемо и задати отвореност лептира гаса преко степ функције, што може симулирати додавање гаса, приликом операције претицања, стим што можемо додати и време које илуструје начин покретања отварања лептира гаса. У самом моделу може се задати и оптерећење кочнице.

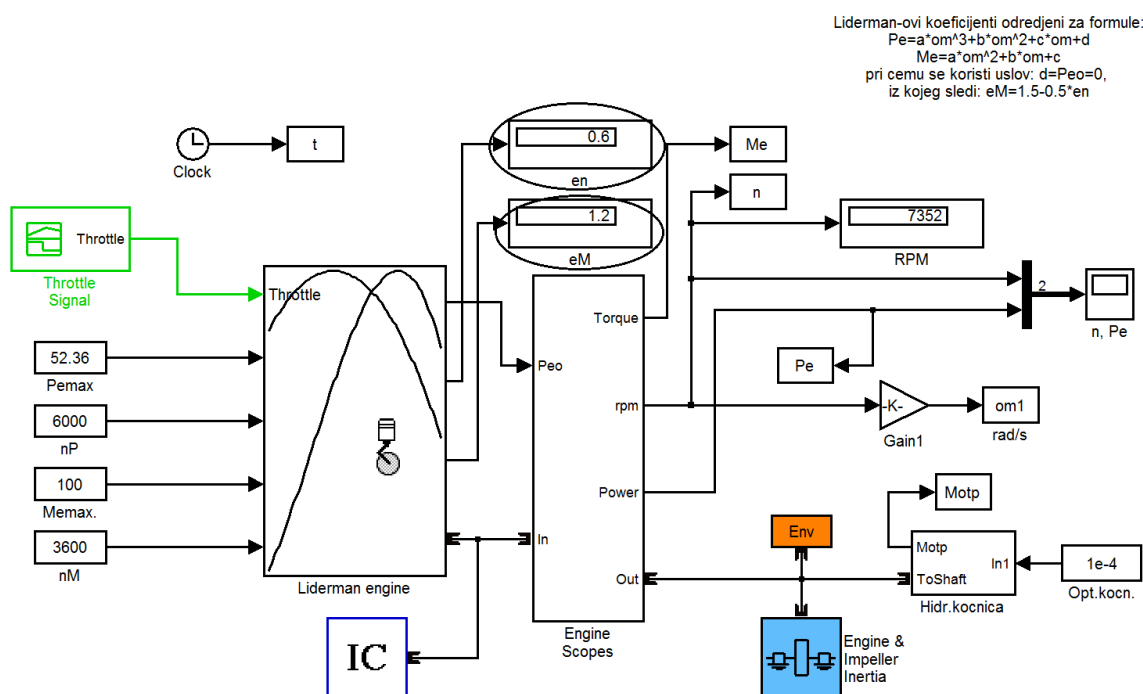
За приказивање могућности примене модела, користиће се подаци које произвођач даје за перформансе мотора, као што је на пример мотор Yugo Florida 1.4l, табела 3.1.

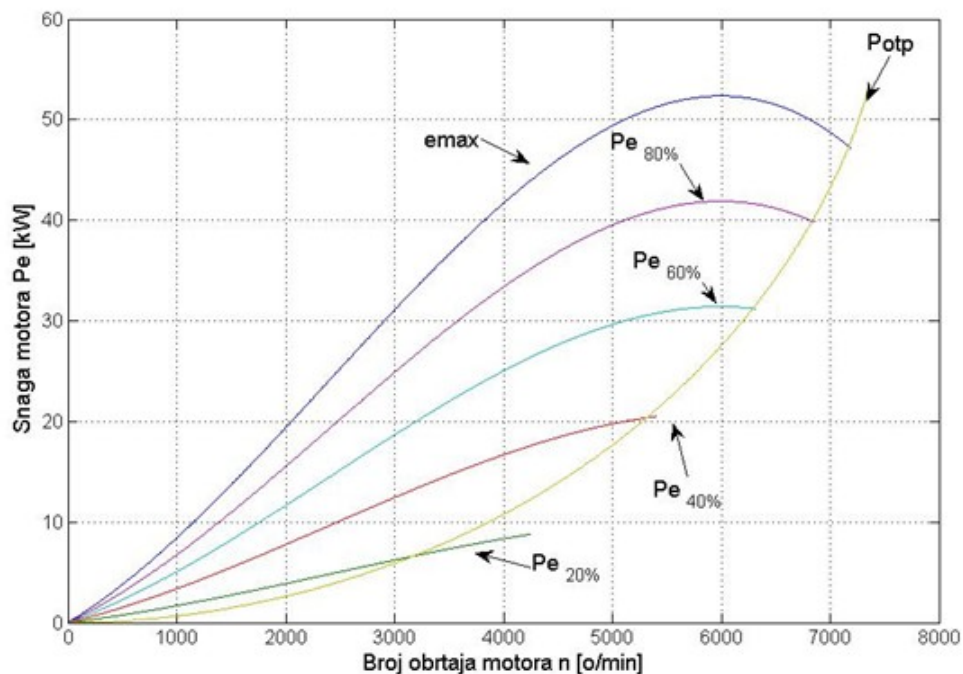
Фабрички подаци о мотору	
Максимална снага, P_{max}	52.4 kW
Број обртаја при максималној снази, n_P	6000 o/min
Максимални обртни момент, M_{max}	100 Nm
Број обртаја при максималном моменту, n_M	3600 o/min

Табела 3.1. Фабрички подаци о мотору Yugo Florida 1.4l

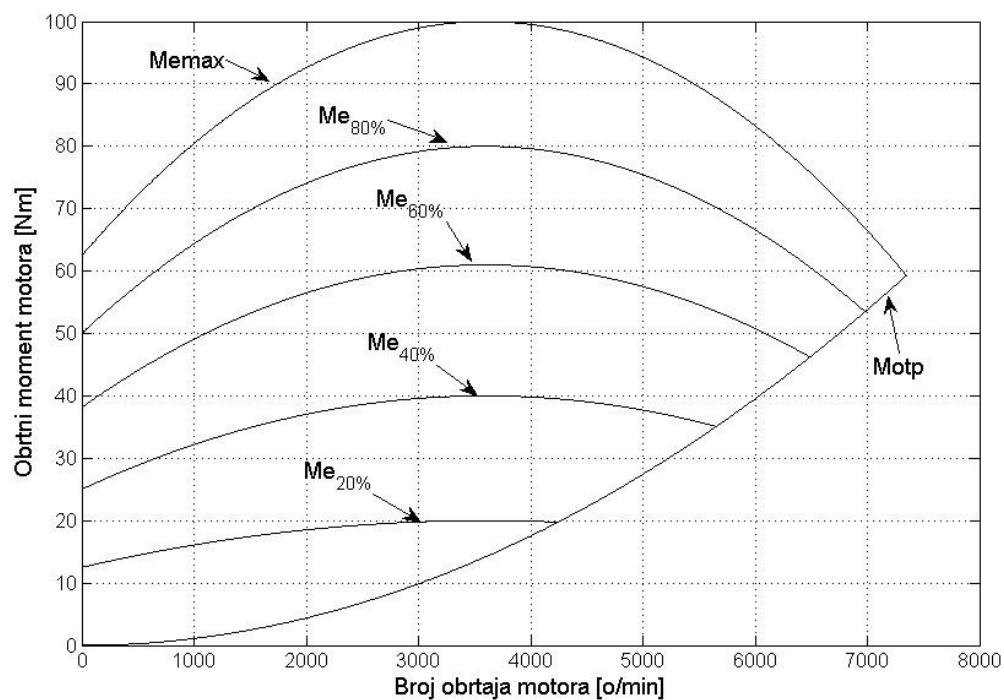


Слика 3.8. Максимална снага и обртни момент [4, 5, 6]

Слика 3.9. Приказ вредности коефицијената еластичности e_n и eM [4, 5, 6]

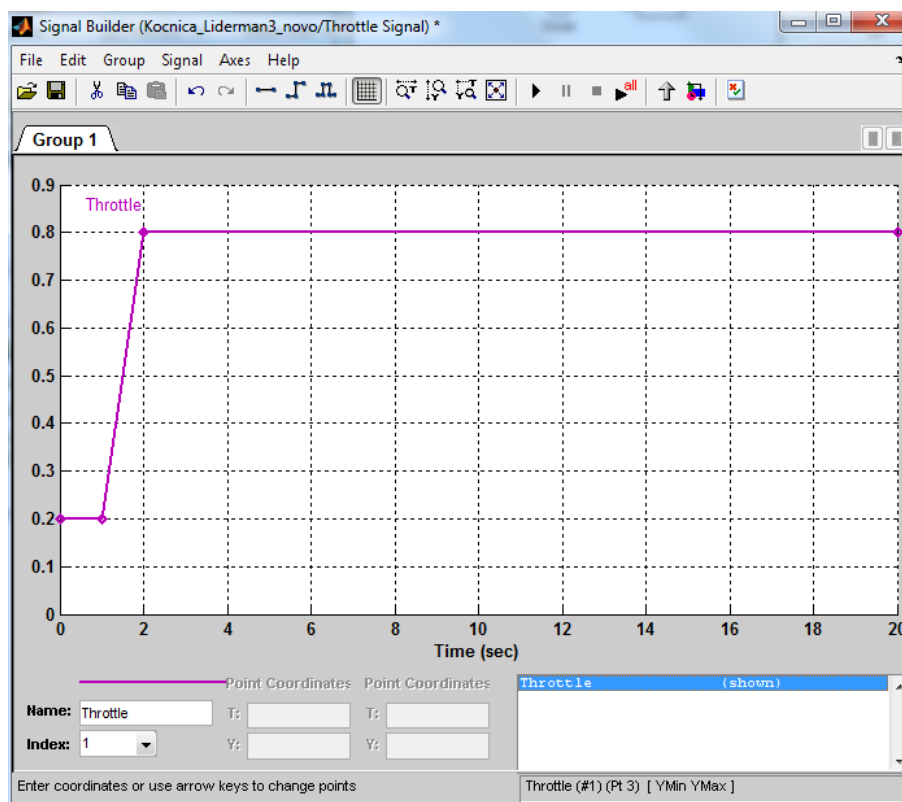


Слика 3.10. Приказ снаге мотора у зависности од угла отворености лептира гаса

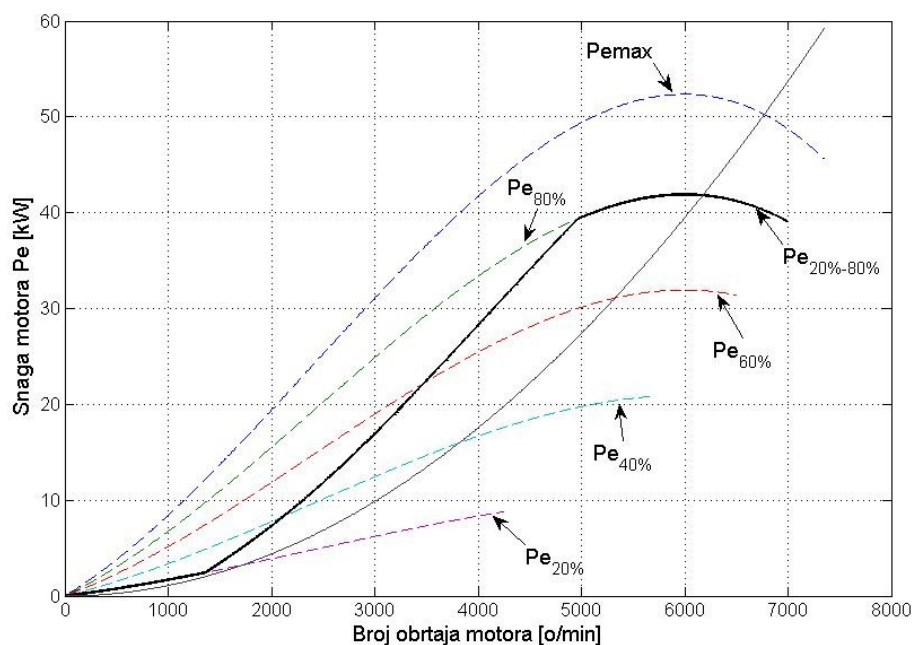


Слика 3.11. Приказ обртног момента мотора мотора у зависности од угла отворености лептира гаса

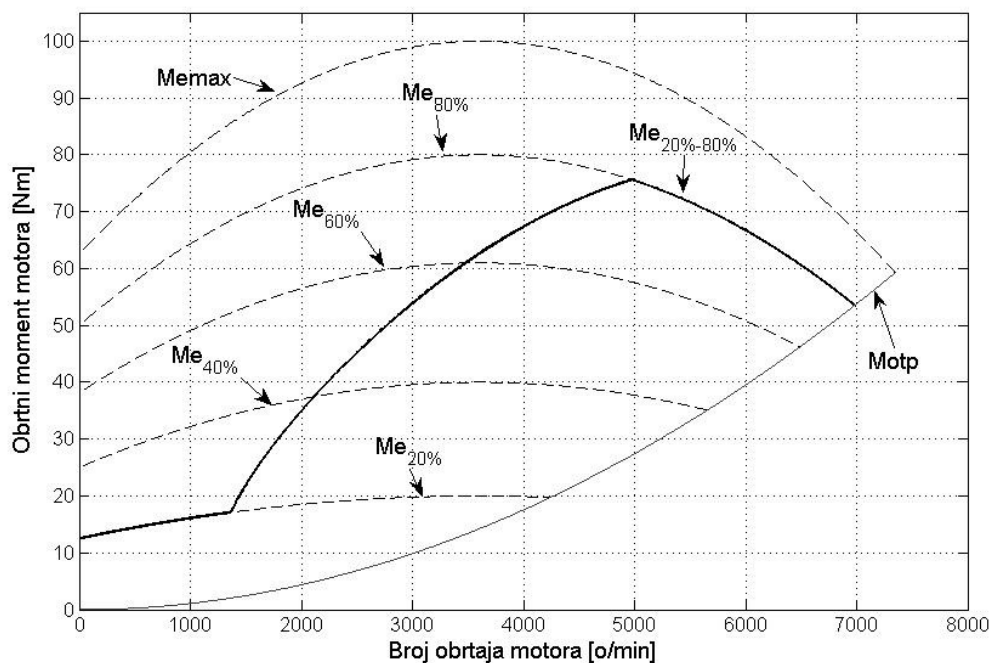
На следећој слици биће приказано поступак задавања степ функције за отвореност лептира, што значи да ће мотор радити у почетку са једном вредношћу отворености лептира, а притом ће бити у току процеса задата друга вредност лептира, што илуструје додавање гаса мотору, слика 3.12. Задавање степ функције ће се заснивати на одређивању тренутка, тј. времена до којег ће мотор радити са 20% отворености, као и време за које је постигло отвореност од 80%. Илустровани график снаге приказан је на слици 3.13.



Слика 3.12. Приказ задавања степ функције



Слика 3.13. Приказ снаге мотора приликом коришћења степ функције за отвореност лептира мотора



Слика 3.14. Приказ обртног момента мотора приликом коришћења степ функције за угао отворености лептира мотора

Коришћењем оваквих симулационих модела могу се варирати разноразни параметри мотора, почевши од четири основна о којим је било помена у ранијем тексту. Могу се одредити облици крива снаге мотора као и обртног момента мотора. Поред ових функција, овакав модел мотора има могућност контролисања добијених крива са кривама снимљеним на пробном столу, о чему ће бити речи у даљем тексту.

4. Верификација модела коришћењем снимљених вредности на пробном столу и карактеристика новијих мотора за путничка возила

Вредновање модела се према [7, 8, 9] у општем случају односи на:

- ваљаност модела (валидатион), којом се испитује слагање понашања модела и система који је моделиран. Ваљаност модела обухвата утврђивање [10]:
 - техничке ваљаности – којом се идентификују све претпоставке модела и њихова дивергенција у односу на стварни систем;
 - операционе ваљаности – којом се процењује значај грешака нађених код испитивања техничке ваљаности и тиме омогућује доношење одлуке о прихватању модела;
 - динамичке ваљаности – којом се предлажу начини одржавања модела током његовог животног циклуса;
- проверу модела (верифицатион), која испитује слагање понашања програма модела кога програм реализује;
 - тестирање исправности и тачности симулационог модела.

У складу са наведеним и узимајући у обзир карактеристике модела дефинисани су поступци којима је реализовано вредновање. Према томе, што се тиче ваљаности модела, свака фаза развоја модела је захтевала одређену проверу и тестирање, са циљем да се прелиминарно обезбеди ваљан модел и, између осталих, то су:

- провера исправности протокола на основу којег је прикупљен узорак (планови реализованих пројеката) – како се поједини параметри модела дефинишу на основу карактеристика емпиријског материјала било је потребно прибавити одговарајуће податке;
- провера софтверске имплементације аналитичке методе – утврђивање да ли су сви параметри и функције тачно дефинисани и имплементирани у софтвер за управљање пројектима;
- тестирање рада модела у софтверу за управљање пројектима – рад модела је тестиран на свим плановима из узорка и у случајевима „најгорег корисника“;
- контрола садржаја програмираног материјала – пилот тестирањем је проверен материјал на основу којег је модел тестиран у настави.

Развојем модела обухваћено је и дефинисање параметара, који такође доприносе испитивању ваљаности и указују на квалитет модела. Неки од ових параметара су:

- мера успешности модела, названа коефицијентом квалитета (qc) – проценат поклапања трајања добијеног применом модела, са стварним трајањем пројектних

планова из узорка. Као минимална граница коефицијента квалитета постављена је вредност $q_c = 1\sigma = 0,68268$;

- вероватноћа реализације пројекта у трајању које се добија моделом – овај податак може да буде релевантан како у фази планирања пројекта тако и у фази његове реализације и да утиче на управљачке одлуке, према томе доприноси квалитету модела.

Поред овога могући су и реализовани су рачунарски експерименти на моделу, који такође дају значајне одговоре на квалитативне карактеристике модела, односно доприносе његовом вредновању.

Верификација модела коришћењем снимљених података са пробног стола, у раду ће бити коришћени подаци о три снимљена мотора а то су:

- Мотор DMB 128A2.064
- Мотор Peugeot TU1JP/L4 1.1l
- Мотор Yugo Florida 1.4l

Приликом снимања задатих мотора, за сваки мотор добијене су карактеристичне тачке као што су број обртаја мотора и излазне величине снаге мотора и обртног момента мотора, табела 4.1, 4.2, 4.3.

Број обртаја мотора n [o/min]	Обртни момент мотора [Nm]	Снага мотора [kW]
1500	87.2	13.7
2000	96	20.1
2500	100.1	26.2
3000	99.9	31.4
3500	104.2	38.2
3750	105.9	41.6
4000	105	44
4500	101	47.6
5000	95.9	50.2
5500	90.5	52.1
5750	86.7	52.2
6000	82.1	51.6
6500	71.5	48.7

Табела 4.1. Подаци снимљени на пробном столу Yugo Florida 1.4l

Број обртаја мотора n [o/min]	Обртни момент мотора [Nm]	Снага мотора [kW]
1520	76	12.1
2000	80	16.7
2520	84	22.2

3040	91	29
3520	95	35
4000	95	39.8
4520	91	43
5000	86	45
5520	82	47.4
6000	72	45.2

Табела 4.2. Подаци снимљени на пробном столу Peugeot TU1JP/L4 1.1l

Број обртаја мотора n [o/min]	Обртни момент мотора [Nm]	Снага мотора [kW]
1000	70.57	7.39
1600	79.13	13.26
2000	83.03	17.39
2600	95.49	26
3000	97.08	30.5
3600	97.24	36.66
4000	79.06	40.66
4600	96.9	46.68
5000	94.95	49.72
5600	91.97	53.94
5800	91.27	55.44
6000	90.39	56.8
6200	88.11	57.21
6400	86.01	57.65
6600	83.3	57.39
6800	79.69	56.75

Табела 4.3. Подаци снимљени на пробном столу DMB 128A2.064

На пробном столу добијају се вредности обртног момента и броја обртаја мотора, пошто је позната релација између обртног момента и снаге, могуће је прорачунати уколико је позната једна вредност, обртни момент, другу излазну вредност, снага мотора:

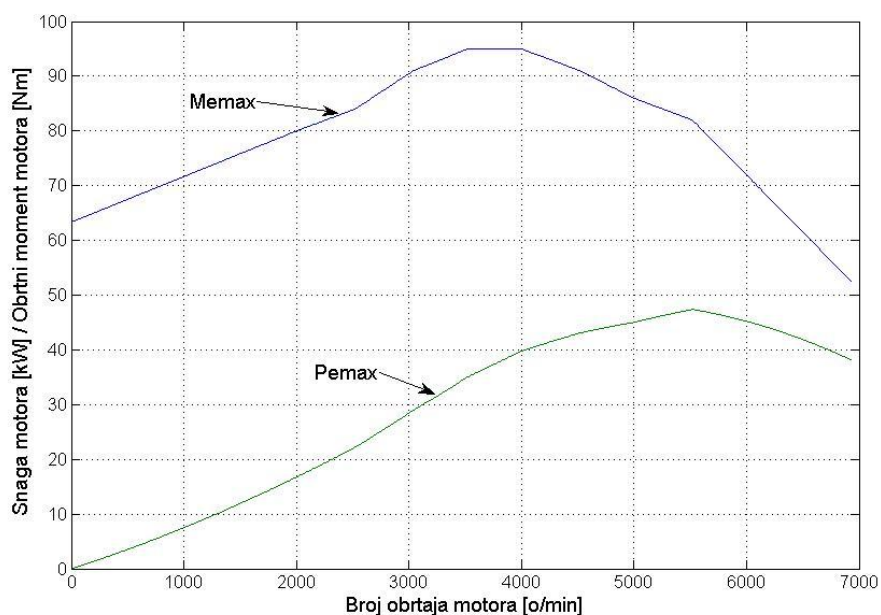
$$P_e = M_e * \omega$$

$$P_e = M_e * \frac{\pi * n}{3 * 10^4} \quad [kW]$$

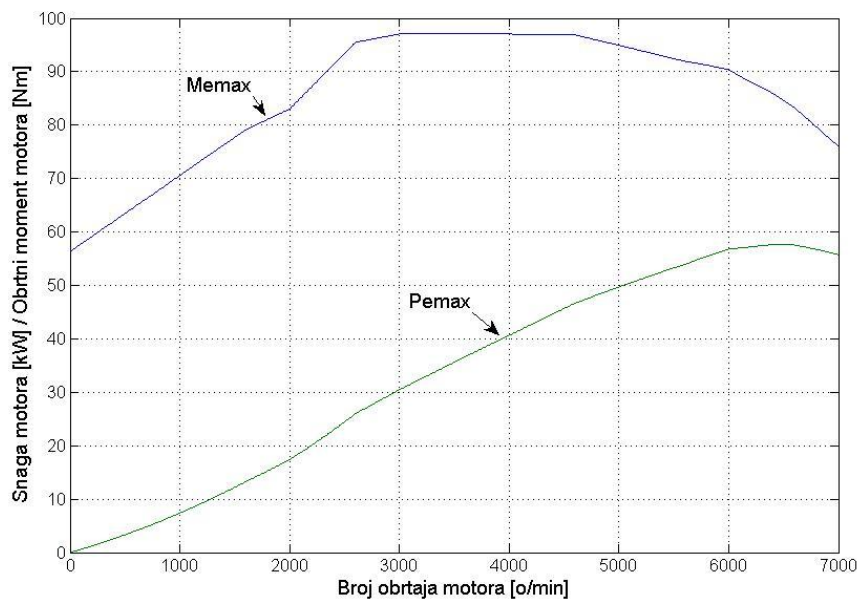
$$M_e = \frac{3 * 10^4}{\pi} * \frac{P_e}{n} \quad [Nm]$$

За јединицу броја обртаја мотора се узима број обртаја у минути [o/min].

Пошто су приказани подаци са пробног стола могу се исцртати излазни параметри за сва три мотора. Пошто већ постоји приказ експерименталних података за мотор Yugo Florida 1.4l, у даљем тексту биће исцртани графици за остала два модела мотора, слике 4.1., 4.2.

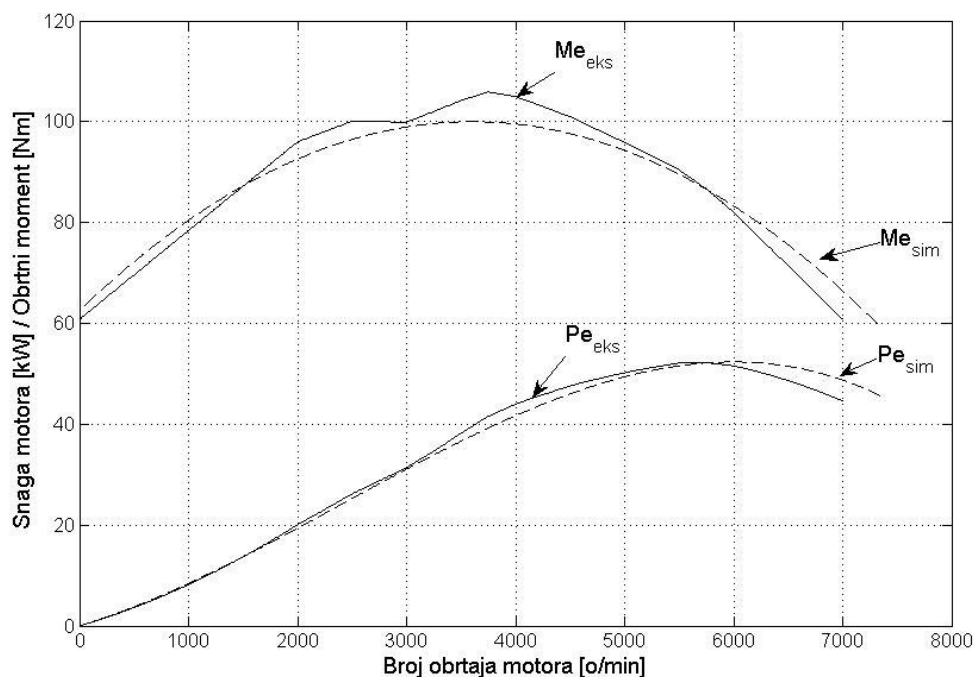


Слика 4.1. Добијени експериментални подаци за мотор Peugeot TU1JP/L4 1.11

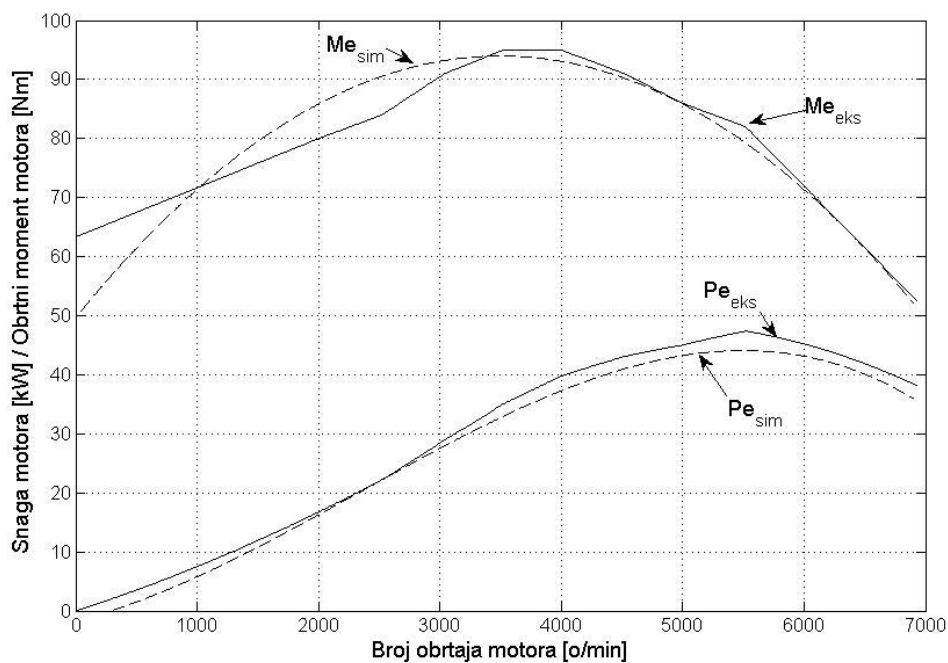


Слика 4.2. Добијени експериментални подаци за мотор DMB 128A2.064

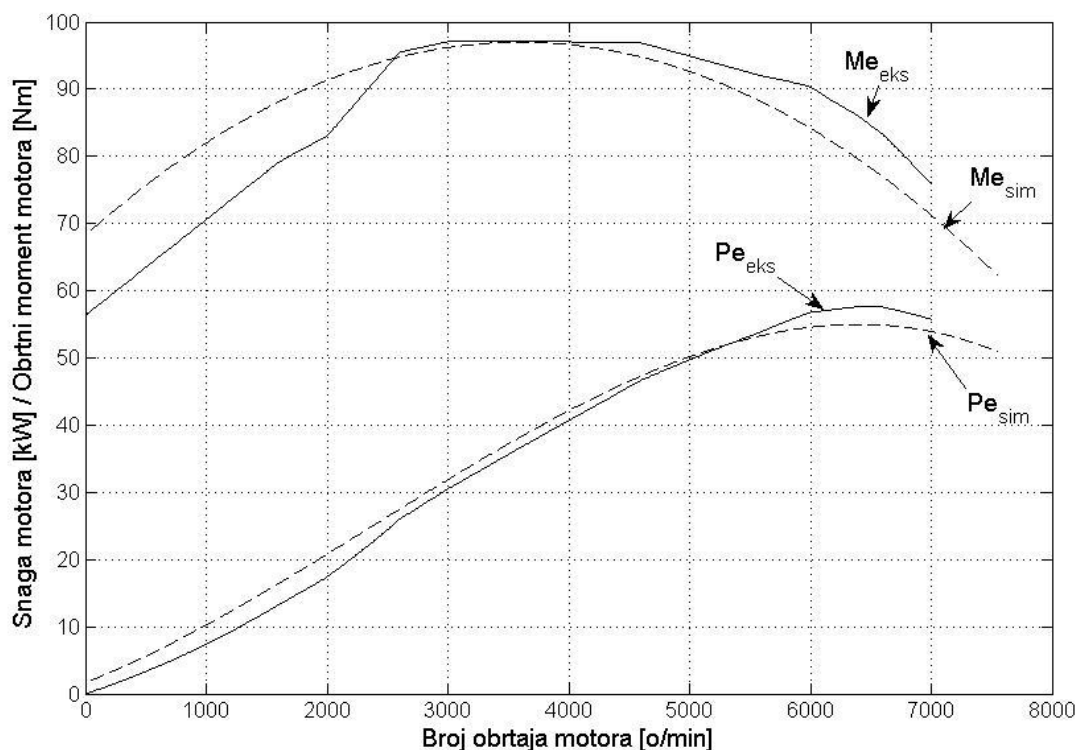
Верификација модела ће се вршити тако што се упоређују криве снаге мотора и обртног момента симулационог модела са кривама снимљеним на пробном столу, где се могу видети одступања реалног модела мотора са симулационим моделом. Провером модела може се установити сама постојаност модела, са стварним условима.



Слика 4.3. Упоредивање експерименталних података пробног стола са симулационим моделом Yugo Florida 1.4l



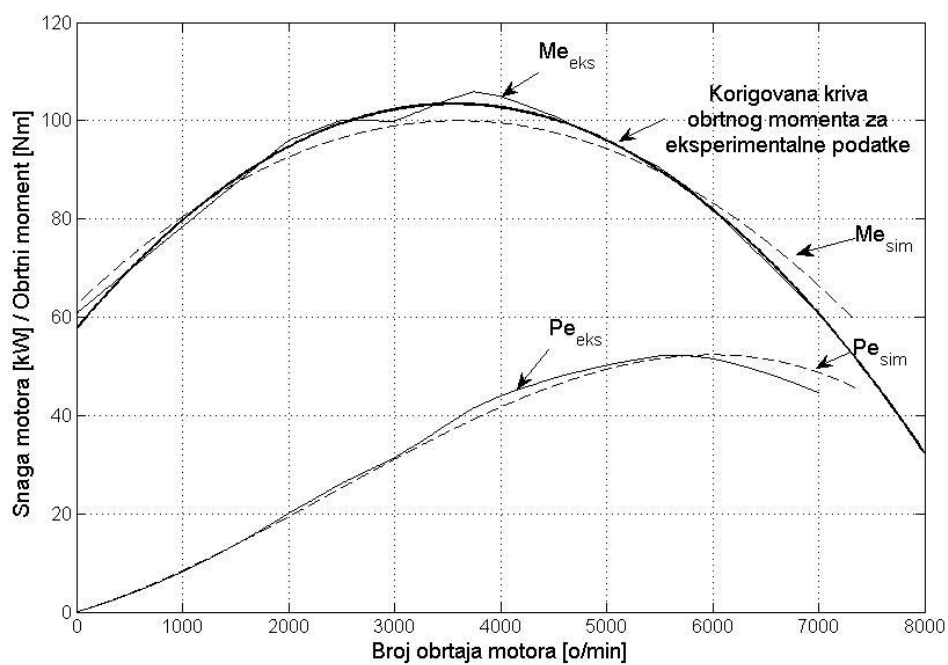
Слика 4.4. Упоредивање експерименталних података пробног стола са симулационим моделом Peugeot TU1JP/L4 1.1l



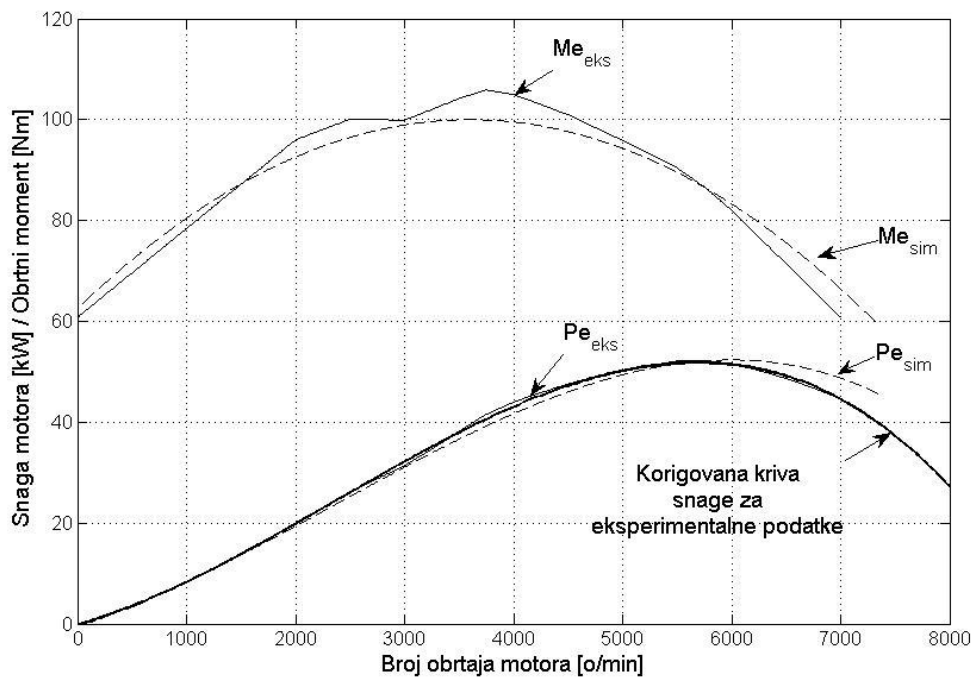
Слика 4.5. Упоредивање експерименталних података пробног стола са симулационим моделом 128A2.064

Из представљеног може се видети да су криве снаге и обртног момента са пробног стола и симулационе криве веома сличне, што говори да симулациони модел приказује и исцртава криве излазних параметара веома веродостојно.

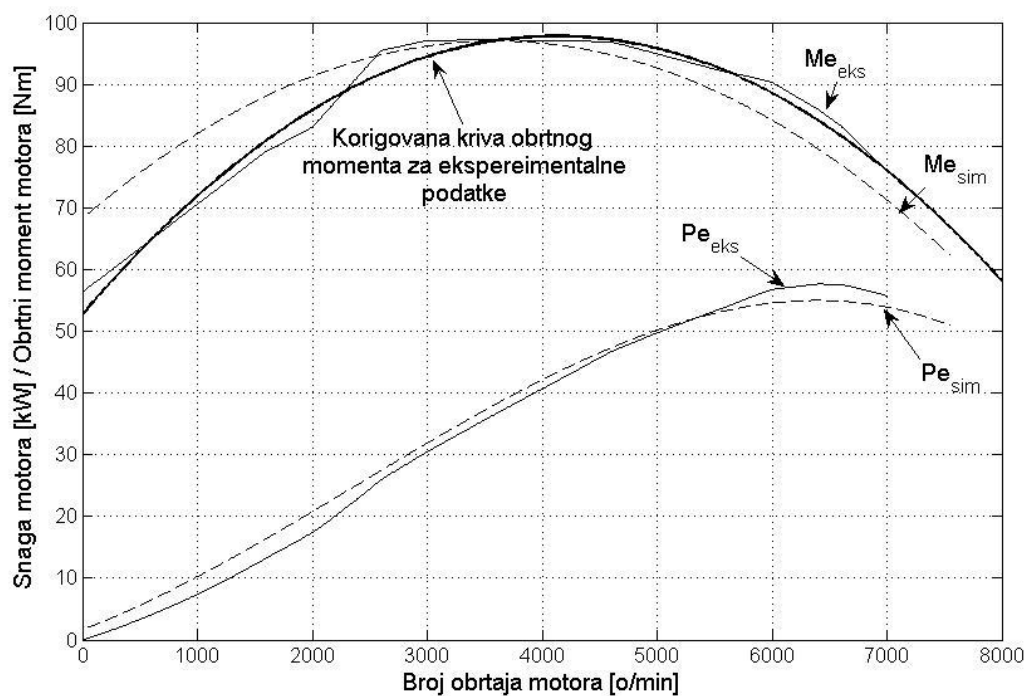
Како би се још више приближила веродостојност симулационог модела, програмски пакет MatLab поседује опцију „fitting“ која се користи приликом обраде података. Њена сврха је да на основу задатих података, података са пробног стола, исцртава кориговане криве, а пошто из предтодног текста можемо закључити да је ктвива снаге кубна, а крива обртног момента квадратна, програм може кориговати криве.



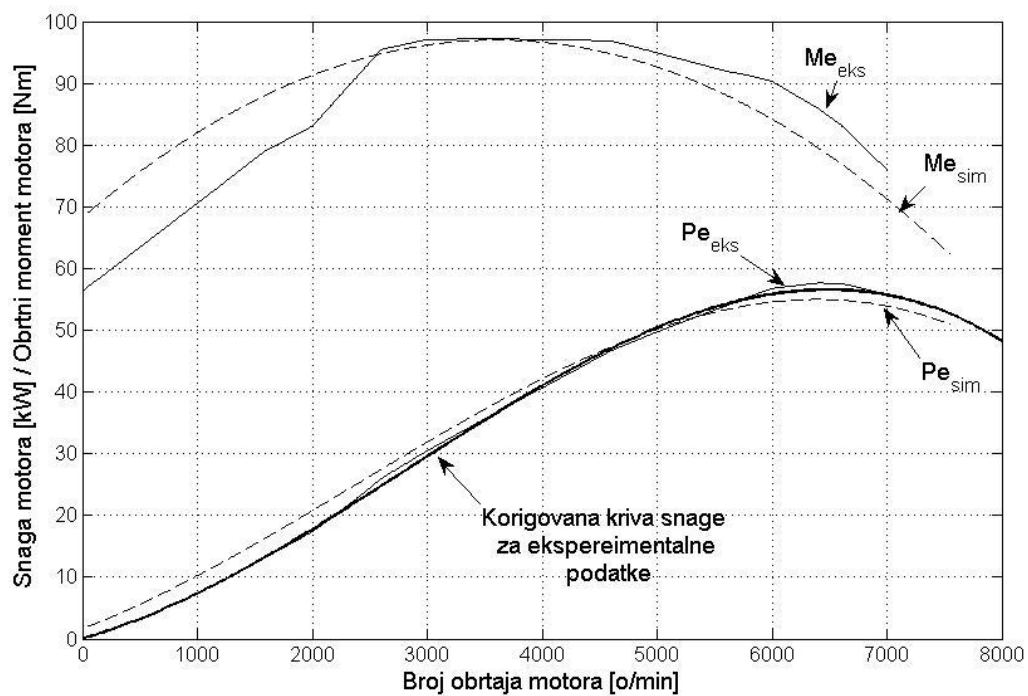
Слика 4.6. Приказ коригованог обртног момента мотора Yugo Flodira 1.4l



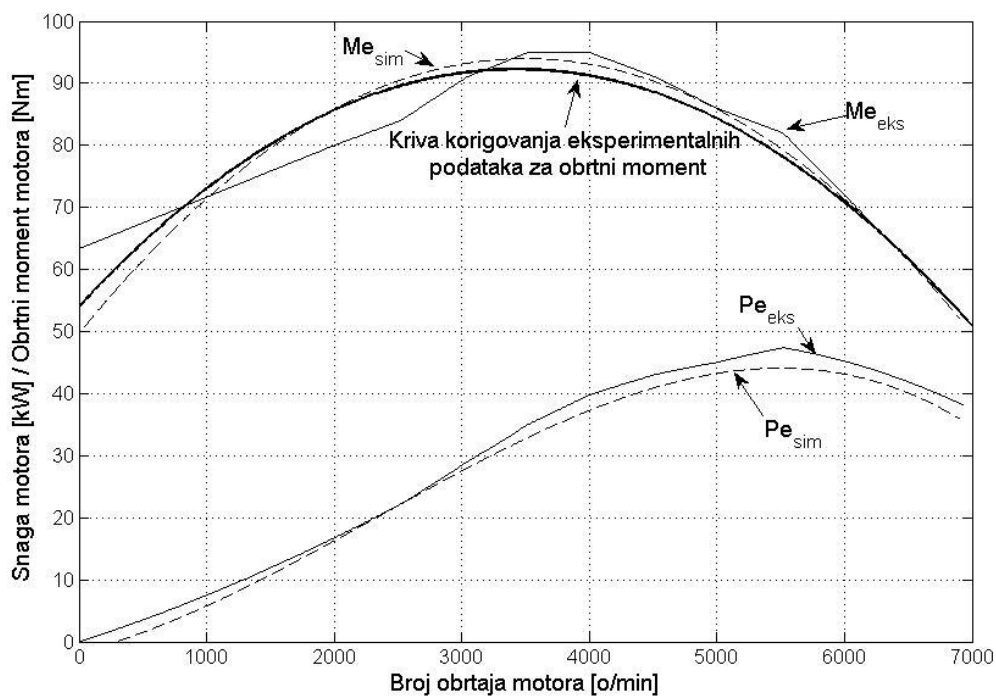
Слика 4.7. Приказ кориговане снаге мотора Yugo Flodira 1.4l



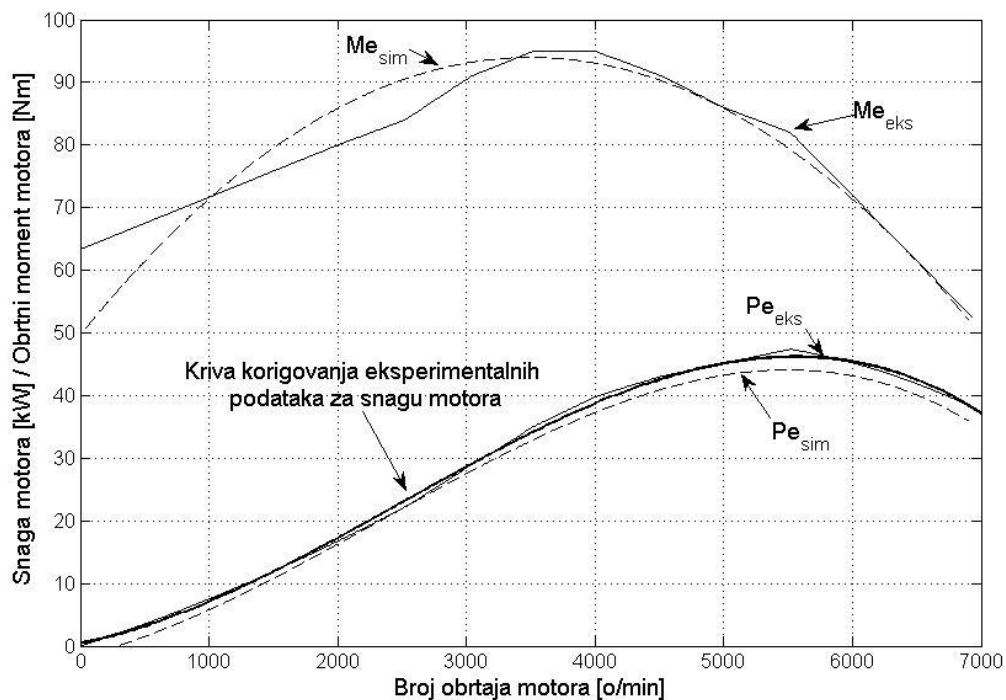
Слика 4.8. Приказ коригованог обртног момента мотора 128A2.064



Слика 4.9. Приказ кориговане снаге мотора 128A2.064



Слика 4.10. Приказ коригованог обртног момента мотора Peugeot TU1JP/L4 1.11



Слика 4.11. Приказ кориговане снаге мотора Peugeot TU1JP/L4 1.11

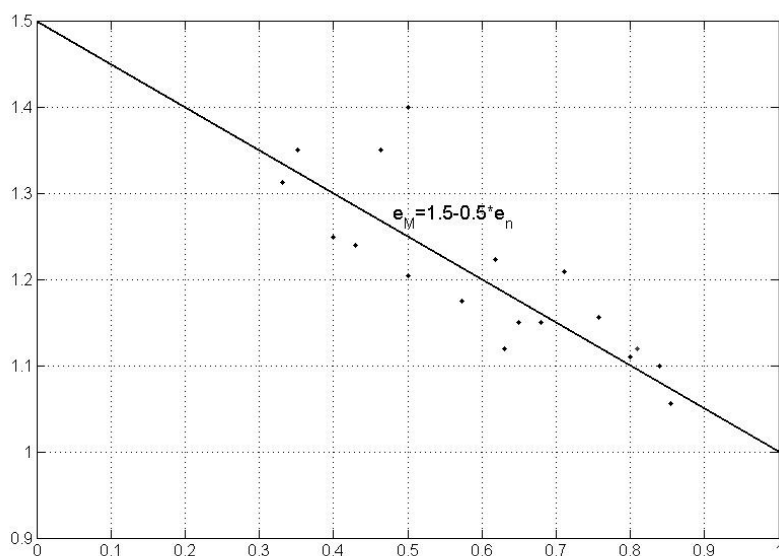
Из представљеног може се закључити да кориговане криве обртног момента и снаге мотора много више одговарају симулационим кривама, што је један од индикатора да симулациони модел подесује веома добру верификацију и валидацију, са стварним моторима пробаним на пробном столу.

Следећи од начина верификације јесте, коришћење упоређивање коефицијената еластичности са једначином зависности која се примењује у моделу за услов када је коефицијент Liderman-ове једначине $d=0$.

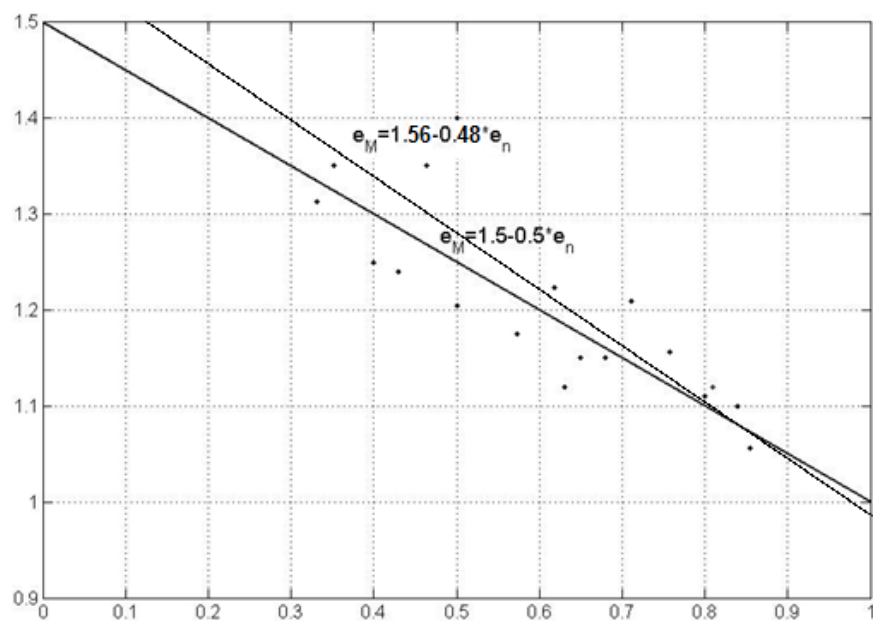
Прикупљањем података произвођача мотора, која је дата у табели 4.4, може се исцртати график зависности једначине са стварним подацима мотора, слика 4.12.

Memax [Nm]	nm [o/min]	Pemax [kW]	np [o/min]	en	eM	Мотори
77.7	3000	40.5	6000	1.205444	0.5	Yugo 55 1.1l
98	3000	48	5800	1.240059	0.517241	Yugo 65 1.3l
136	3500	70	5500	1.119008	0.636364	Yugo Florida in 1.6
123.4	2000	51.5	5000	1.254607	0.4	Honda Civic CX (1992-1995), motor 1.5 8-Valve SOHC
132.9	5000	75	5900	1.094827	0.847458	Honda Civic DX (1992-1995), motor 1.5 16-Valve SOHC
131.5	4500	67.6	5500	1.120396	0.818182	Honda Civic VX (1992-1995), motor 1.5 16-Valve SOHC VTEC-E
148	3750	77	5750	1.15736	0.652174	Dacia 1.6 16v
200	1900	66	3750	1.19	0.506667	Dacia 1.5 dCi 90
240	1750	81	4000	1.241126	0.4375	Dacia 1.5 dCi 110
300	2000	88	4000	1.428	0.5	Honda Civic 2012 1.6 i-dtec
678	1500	478	6000	0.891215	0.25	BMW M5 2013 4.4l 8v DOHC
400	4750	250	6900	1.156109	0.688406	BMW M5 1995 3.8l
127	4800	72	6000	1.108287	0.8	Honda Civic 2012 1.4 i-vtec
250	2700	81	3500	1.131235	0.771429	Ford 1.8 TDCi Common Rail
350	2200	125	4200	1.231507	0.52381	Audi A3 2.0 TDI 2003
174	3700	104	6500	1.13883	0.569231	Honda Civic 2003 1.8 i-vtec
250	3620	118	5000	1.109322	0.724	Audi A3 1.8 TDI 2003

Табела 4.4. Приказ основних параметара за израчунавање криве снаге и обртног момента [11, 12]



Слика 4.12. Приказ зависности једначине $e_M = 1.5 - 0.5 * e_n$ са стварним подацима коефицијената еластичности



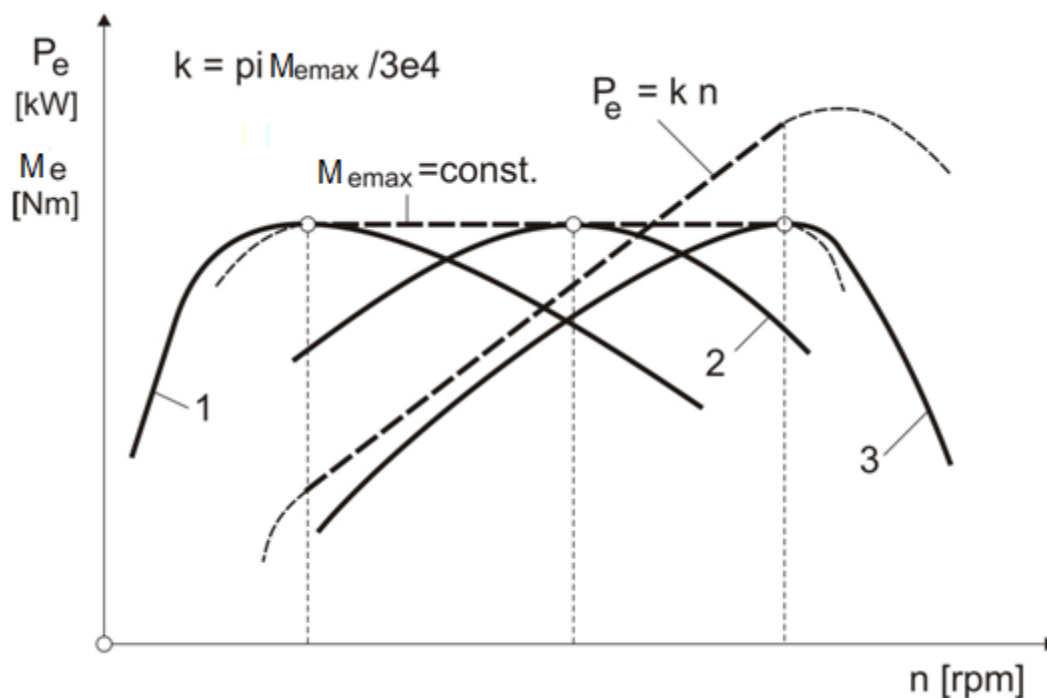
Слика 4.13. Приказ зависности једначине $e_M = 1.5 - 0.5 * e_n$ са једначином стварних података за изабрне моторе

Слике 4.12. и 4.13. говоре о томе да су подаци преузети од произвођача мотора веома слажу са једначином зависности коефицијената еластичности, што употпуњује слику верификације модела, који у веома малој мери одступа од података реалних мотора.

5. Могућност примене модела на моделирање карактеристика новијих мотора за путничка возила

Сагледавањем савремених мотора са унутрашњим сагоревањем може се запазити да водеће аутомобилске компаније теже да задрже константан обртни момент као и снагу мотора, на одређеном броју обртаја, слика 5.1. Како би постигли такав ефекат, водеће компаније производе разноразне системе који ће омогућити задржавање одређеног обртног момента и снаге мотора за дати распон броја обртаја.

Системи који допринесе овом ефекту су шеме развода, која поседује велики број решења, неки од њих су интелигентни Vtec, који су развили компанија Honda, MultiAir који је развио Fiat, BMW-VALVETRONIC, итд. Следећи степен развоја јесте примена електромагнетних вентила, који ће омогућити потпуно контролисање отворености и затворености вентила мотора.



Слика 5.1. Приказ константног обртног момента и снаге мотора

На слици 5.1. могу се видети три облика момената који се у савременим моторима обједињују, прва крива момента говори да се ради о моторима веома малиг запремина, који су веома економични, други облик криве говори о томе да се ради о јачим моторима где су веће перформансе возила на већем броју обртаја, док трећи облик криве говори о томе да се ради о спортским моторима.

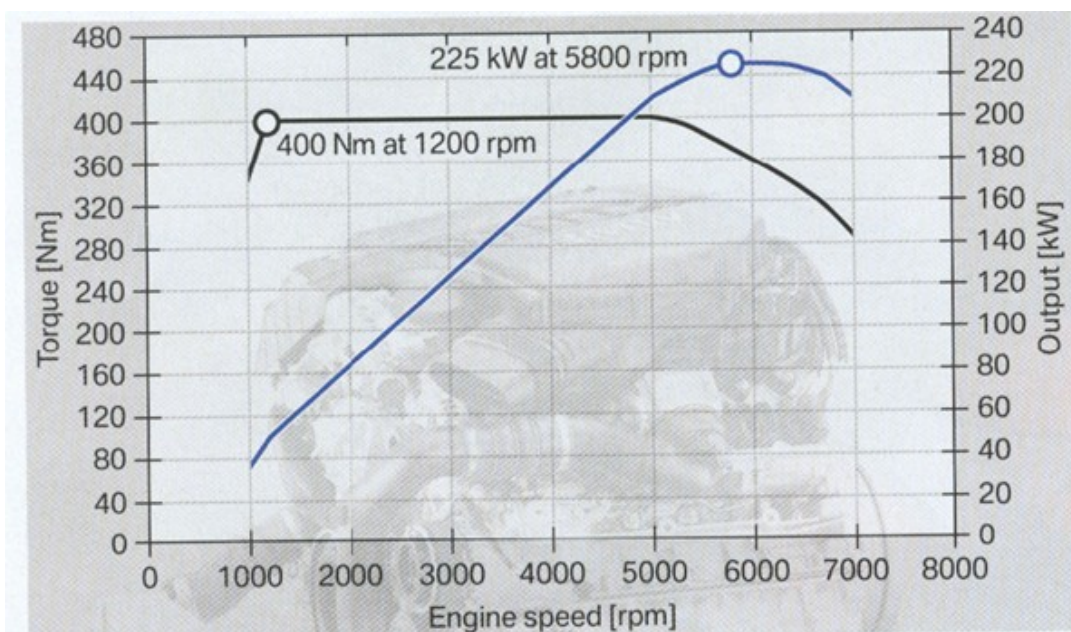
У табели 5.1., биће приказани подаци произвођача мотора, са распоном броја обртаја коришћења снаге мотора и обртног момента.

Мемак [Nm]	nm [o/min]	Ремак [kW]	np [o/min]	Произвођачи
174	2000-4300	104	6500	Honda Civic 2012 1.8 i-vtec
250	1500-3200	81	3500	Ford 1.8 TDCi Common Rail
250	1500-4200	118	5000	Audi A3 1.8 TFSI 2003
350	1750-2500	125	4200	Audi A3 2.0 TDI 2003
249	1250-5000	132	5100-6200	Audi A3 2012 1.8 TFSI 6MT
320	1750-3000	110	3500-4000	Audi A3 2012 2.0 TDI 6MT

Табела 5.1. Прикупљени подаци савремених мотора [11, 12]

Коришћењем облика крива приказаним као на слици 5.1., дободи се до поједностављења симулациониг модела, зато што се ради о линеадним једначинама, чије је прорачунавање једноставније од предходних, квадратна за обртни момент мотора и кубна за снагу мотора. Из чега призилази да бе симилирање и моделирање модела могло извршити без већих проблема, али ипак би било потребно време испитати дати модел са реалним параметрима

Код савремених аутомобила, захваљујући примени варијабилних система (шеме развода, геометрије усисног система, натпуњења мотора), могу се остварити брзинске карактеристике са константним обртним моментом у широком дијапазону броја обртаја. Једна таква карактеристика приказана је на слици 5.2.



Слика 5.2. Пример савременог мотора произвођача BMW [1]

6. Правци даљег развоја у овој области

Данас је скоро незамисливо обављати било какав инжењерски посао без помоћи рачунара. Компјутери, међутим, нису свемоћне справе које могу лако да замене човека, али зато вишеструко убрзавају сложене радње пројектовања мотора са унутрашњим сагоревањем.

Процес пројектовања и производње мотора с унутрашњим сагоревањем (СУС) данас не може ни почети без адекватне верификације идеје, прве и најважније етапе у овом послу. Савремени мотори углавном се израђују усавршавањем постојећих, то јест осавремењавањем старијих решења помоћу софтверских алата. Први корак је градња тзв. испитивачког моноцилиндра, репрезентатива који служи за добијање параметара будућег мотора. Добијени параметри уносе се у одговарајући софтвер који кроз комплексан математички модел опонаша сложене физичко-хемијске процесе у мотору. Тако конструисани моноцилиндри доцније се, попут коцкица, слажу у мотор. Овакав концепт значајно поједностављује процес тестирања, јер је, на пример, исплативије направити осам различитих глава за један моноцилиндар него исти број глава за један шестоцилиндар. Када се тако конструисан мотор стави у погон, прикупљају се параметри рада моноцилиндра (индицирање мотора) на основу којих се развија математички модел који се даље обрађује на рачунару.

Математички модели мотора израђују се на основу законитости термодинамике, механике флуида, хемијске кинетике и других наука. У зависности од типа мотора на коме се ради (двотактни, четвортактни, спороходни, брзоходни, дизел, ото-мотор и сл.) бира се одговарајући софтвер у ком ће се опонашати рад тог мотора. Такав софтвер је изузетно комплексан јер садржи знања и искуства сакупљана током више од једног века, помоћу којих се инжењери труде да што верније осликају рад мотора кроз математичке формуле. У неким етапама рада користе се сопствене софтверске алате за испитивање и симулирање феномена који се одвијају у мотору и другим подсистемима. На пример, издувни систем иако се наизглед не чини превише сложеним, није ни мало лак проблем за прорачун облика, дужине, буке, токсичне емисије, пригушења или снаге. Издувни систем мора да задовољи бројне стандарде, а при пројектовању треба водити рачуна о буквално свакој кривини, сужењу или препреци које доводе до нарушавања струјне слике, као и о физичким особинама гасова (температури и притиску) од којих зависи ефикасност издувног система. Овако компликоване прорачуне данас је готово немогуће радити без помоћи компјутера, чији брз развој конструкторима омогућује да користе све комплексније формуле и начине готово идеалан модел.

Имајући у виду да се већина процеса и појава у мотору може моделирати и прорачунавати помоћу компјутера, да се моторски делови могу „израдити” на рачунару и да сам рад мотора тј. његових склопова и подсклопова може бити успешно симулиран на рачунару, долазимо и до концепта „виртуелног” мотора. Под тим се подразумева могућности да се

мотор направи, симулира и тестира на рачунару пре било какве израде реалних прототипова и њиховог испитивања.

Програми за пројектовање мотора могу се грубо поделити у две велике групе. Прву чине програми за термодинамички прорачун, а другу програми за механички прорачун. Постоје и прогмаски пакети као што је MatLab који може објединити ове две велике групе.

Будући да је СУС мотор у бити топлотна машина која хемијску енергију горива процесом сагоревања претвара у топлотну енергију, а део ове енергије претвара се у користан рад, пројектовање мотора мора почети од термодинамичког прорачуна. Овај софтвер, поред тога што се бави хемијским процесима сагоревања и процесима преноса и размене топлоте, прорачунава и струјање гаса на улазу у радни простор, у његовој унутрашњости и на излазу. Програми приказују температуру гаса у току рада виртуелног мотора, као и претпоставке температура којима подлежу поједини механички делови мотора. Сем температура приказује се и струјна слика у радном простору, односно на његовом улазу и излазу. Тако је конструктор у могућности да прати ток температуре, притисака и брзина струјања гаса и да разноврсним интервенцијама на виртуелном мотору врши његову оптимизацију.

Овакве појаве могу да се виде на реалном моделу, али је за то потребна изузетно скупа видео-опрема која у већини случајева не пружа толико детаља као рачунарска симулација.

Термодинамички прорачун мотора ослања се на већ поменуте математичке моделе термодинамике, преточене у сложене аритметичке једначине, које омогућавају праћење процеса у мотору, у времену и простору.

Коришћењем оваквих програмских пакета, моћи ће се усавршавати постојеће параметре мотора, као и пројектовање сасвим нових параметара. Даљим усавршавањем модела који је дат у раду могу се испратити и најсавременија возила, која поседују константне криве снаге мотора и обртног момента, у одређеном дијапазону броја обртаја.

Применом оваквих симулационих модела значајно из разлога зато што је могуће и пре саме израде новог мотора, видети какве криве снаге и обртног момента се могу очекивати, као и све излазне параметре које модел поседује.

Даљи правци развоја у овој области су усавршавање постојећег модела. Што ће допринети економичнијим испитивањима мотора, као и варирање параметара мотора на основу којих ће се знати излазни параметри који су од веома великог значаја за перформансе мотора, па и будућег возила.

7. Закључци

Примениом симулационих модела за истраживање брзинских карактеристика возила важно је са аспекта економских услова, из разлога што се могу вршити безброј прерада на самом моделу, као и варирање параметара како би се добили што кориснији и ефикаснији излазни параметри, а то су крива снаге мотора и обртног момента мотора.

Потребно је прикупити што више параметара од испитаних мотора на пробном столу, како би симулациони модел био што валиднији и верификованији. Уколико се симулациони модел приближи реалном мотору, може се са већом сигурношћу пројектовати нови мотор, као и његово испитивање у презентованој симулацији.

Симулациони модели су веома распрострањени и све је већа њихова примена, зато што се њихова успешност да симулирају процесе мотора све већа и поузданија.

Све што видимо око нас укључујући и нас саме може се описати математичким изразима. Уз довољно познавање појаве која нас занима, можемо направити њен математички модел. Тај модел можемо описати на рачунару и кроз симулације открити његово понашање које је мање или више блиско стварном.

Сваки од поменутих симулационих система има своје предности и мане тако да ће се у будућности радити на њиховом усавршавању и отклањању, што ће довести до максималног искоришћења модела, првенствено при пројектовању нових мотора који су у фази пројектовања.

8. Литература

- [1] Предавања из предмета Мотори СУС 2, Д. Радоњић, 2013. године
- [2] Mobiliti & Vehicle Mechanics, Volume 36, Number 1, March 2010, Editors: Prof. dr A. Janković, Prof. dr Č. Duboka , Facultz of Mechanical Engineering in Kragujevac 2010.
- [3] Д. Радоњић, Р. Пешић, Топлотни прорачун мотора СУС, Машински факултет у Крагујевцу 1996., књига од 171 страна
- [4] Пакет програма MatLab
- [5] B. Naylor. et all. (1966), Computer simulation techniques, John Wiley & Sons, New York.
- [6] Introducing to MatLab for Engineering Students, D. Houcque, Northwestern University, August 2005
- [7] Zeigler, B.P., *Theory of Modelling and Simulation*, John Wiley, New York, 1976.
- [8] Sargent, R.G., *Verification and Validation of Simulation Models as Proggress in Modelling and Simulation*, ed F.E. Cellier, Academic Press, London, 1981.
- [9] Gass, S.I., *Secision-Aiding Models: Validation, Assessment and Related Issues for Policy Analysis*. Operat. Res., vol. 31, No 4, 1983. pp. 603-631.
- [10] Schellenberger, R.E., Criteria for Assessing Model Validity for Managerial Purpose. Decision Sci. Vol. 5, No 4, 1974, pp. 644-653.
- [11] <http://www.autoevolution.com/cars/>
- [12] http://en.wikipedia.org/wiki/Honda_D_engine