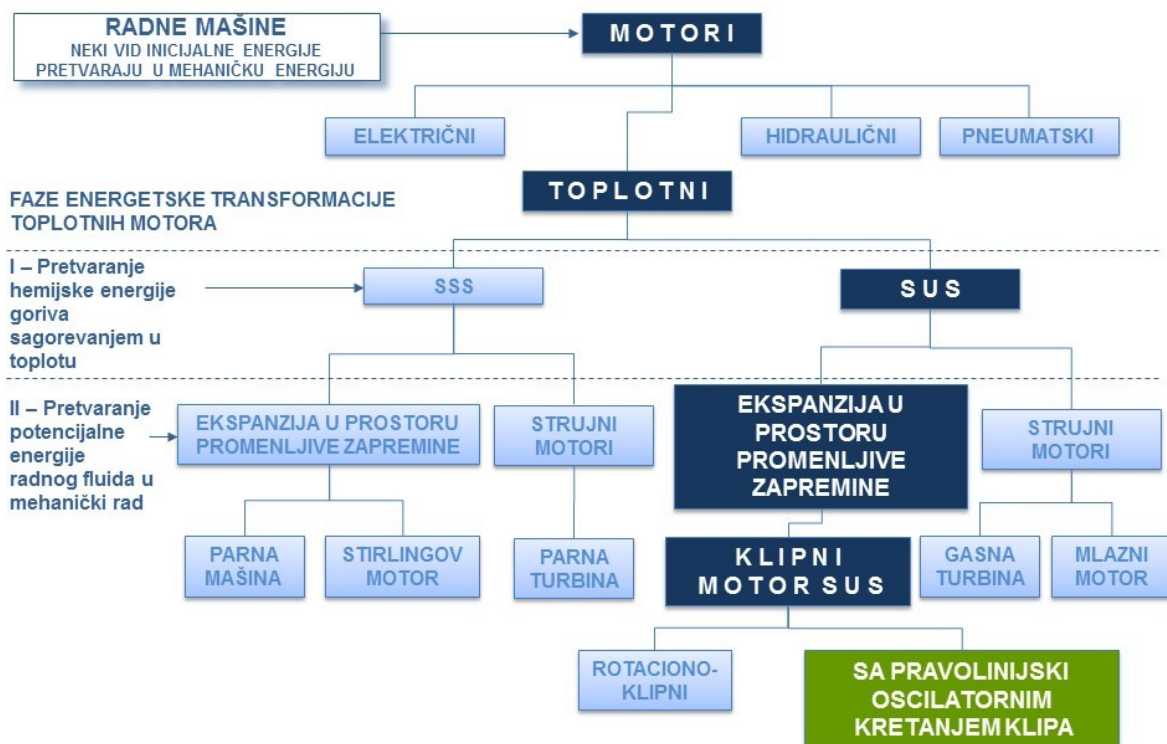


1. Шта је мотор? Шта је топлотна машина?

Мотор у општем случају представља погонску машину која неки облик енергије претвара у механички рад. У зависности од тога који вид енергије претварају у механички рад, разликујемо електромоторе, топлотне моторе, пнеуматске моторе, хидрауличке моторе. Топлотни мотори, представљају посебну групу погонских машина код којих се топлотна енергија добијена сагоревањем одређене врсте горива, користи за добијање механичког рада. У зависности од тога где се ослобађа топлота, односно где се обавља сагоревање горива, топлотни мотори се деле на две групе:

- мотори са спољним сагоревањем (мотор ССС)
- мотори са унутрашњим сагоревањем (мотор СУС)

Преглед различитих врста погонских машина и подела према виду иницијалне енергије и начину трансформације енергије у механички рад приказан је на сл. 1.



Сл. 1 - Подела мотора према виду иницијалне енергије

Шта је мотор са спољним сагоревањем?

Хронолошки, а и технолошки, мотор ССС претходи ономе што данас препознајемо као основни и преовлађујући тип топлотног мотора – мотор са унутрашњим сагоревањем (мотор СУС). То је топлотна машина код које се ослобађање топлоте (сагоревање, односно трансформација хемијске енергије горива у топлоту) обавља у посебном систему (ложиште котла) у коме се енергетски потенцијал радног флуида, најчешће водене паре, подиже на виши ниво. Трансформација топлотне енергије у механички рад обавља се у посебном систему, најчешће клипној машини или парној турбини. Места трансформације хемијске у топлотну енергију и топлотне енергије у механички рад код мотора ССС физички одвојена, због чега су топлотни и струјни губици повећани. Зато је укупан степен корисности ове врсте топлотних мотора низак и креће се у опсегу од скромних 10+15%. Велики габарити, велика маса, мала специфична снага представљају основне недостатке овог типа

топлотних мотора. Међутим, конструкција и одржавање су једноставни, сагоревање се обавља у стационарним условима (контролисаним), могу се користити различите врсте чврстог, течног или гасовитог горива (различити горионици) без посебног ограничења у погледу њихових карактеристика, због чега се оваква решења користе код термоенергетских постројења или бродских погонских машина.

Шта је мотор са унутрашњим сагоревањем?

Општа дефиниција мотора СУС говори о томе да је то врста топлотне машине код које продукти сагоревања, на вишем енергетском потенцијалу који се остварује током сагоревања и ослобађања топлоте, својим директним дејством остварују механички рад. У зависности од тога на који начин се енергија продуката сагоревања претвара у механички рад, мотори СУС се деле на:

- струјне моторе (гасна турбина, нпр.) код којих се рад остварује на рачун кинетичке енергије продуката сагоревања који експандирају из горионика у виду млаза који се користи за погонски потисак код млазног мотора или за добијање обртног момента вратила турбине.
- моторе са променљивом запремином радног простора код којих је променљивост радне запремине остварена применом клипног механизма (због чега се називају клипним моторима)

Код клипних мотора у истом простору се обавља измена радне материје (издување продуката сагоревања и усисавање свеже радне материје), сагоревање и експанзија током које се остварује трансформација топлотне енергије у механички рад. Основне предности клипних мотора су: добра економичност (25÷50%), висока специфична снага (снага по једници масе мотора), компактност градње, широк радијус кретања због коришћења горва високе енергетске густине, брза спремност за рад и троше гориво само током рада. Међутим, клипни мотори имају и бројне недостатке и ограничења, као што су: осетљивост на квалитет горива (мора се користити гориво одређеног састава и карактеристика), лошије еколошке карактеристике (токсичност продуката сагоревања и бука), сложеност конструкције, руковања и одржавања, висока цена производње и висока цена и дефицитарност погонског горива (необновљиве резерве угљоводоничних горива).

2. Кратак хронолошки преглед развоја мотора СУС

Идеја о топлотним моторима окупира мислиоце и истраживаче већ неколико векова. Из архива и библиотека сазнајемо о радовима Леонарда да Винчија (da Vinci, почетак 16. века) и познатог холандског физичара и оптичара Хајгенса (Christian Huygens, 17. век) у којима се први пут спомињу топлотни мотори без сабијања радне материје. Волта (Alessandro Volta) 1780 године електричним варницама успева да упали смешу ваздуха и водоника, а 1807 швајцарски инжењер де Рива (Francois Isaac de Rivas) гради први мотор са унутрашњим сагоревањем погоњен смешом кисеоника и водоника. Из богате историје развоја мотора издвајамо неколико датума за које сматрамо да представљају прекратницу у разумевању и развоју идеје о савременом клипном мотору СУС:

- 1824: француски физичар Карно (Sadi Carnot) поставља термодинамичке принципе идеалног топлотног мотора (Карноов циклус) и по први пут уводи процес сабијања ради повећања температуре радног флуида.
- 1838: Енглец Барнет (William Barnet) региструје патент за сабијање гаса унутар цилиндра.
- 1854-7: Италијани Барсанти (E. Barsanti) и Матеучи (F. Matteucci) патентирају идеју о 4-тактном мотору (по први пут се спомиње овај термин), али су подаци о њиховом патенту изгубљени.
- 1856: Бенини (Pietro Benini) гради радни прототип мотора на основу идеја Барсантија и Матеучија. Први мотор развија 5 КС (3.4 kW), за којима следе побољшане верзије са 1 и 2 цилиндра.
- 1860: Белгијанац Леноар (Jean Joseph Etienne Lenoir, 1822–1900) гради гасни мотор СУС по угледу на постојеће парне моторе (са свим данас препознатљивим деловима: цилиндри, клипови, клипњаче, замајац). Леноаров мотор се сматра првим масовно произвођеним мотором СУС.
- 1861: Француз д' Роша (Alphonse Beau de Rochas) региструје патент за теоријски радни процес 4-тактног мотора којим показује да је ради побољшања ефикасности, пре сагоревања неопходно сабити радну материју (смешу). Спекулише се да је годину дана раније Аустријанац Рајтман (Christian Reithmann) чак направио мотор на овом принципу, али за то не постоје чврсти докази (не постојање патента).
- 1862: Немачки проналазач Ото (Nikolaus Otto) први успева да направи гасни мотор са упаљењем помоћу електричне варнице.

- 1876: Ото, Дајмлер (Gottlieb Daimler) и Мајбах (Wilhelm Maybach) усавршавају 4-тактни мотор (Отова фабрика мотора Deutz AG). Патент о томе није прихваћен, и идеја о 4-тактном мотору са сабијањем смеше постаје опште прихваћена.
- 1881: Шкотланђанин Клерк (Sir Dugald Clerk) патентира (у Енглеској) принцип двотактног мотора са вентилима и посебним цилиндром за напајање (клипни компресор). Деј (Joseph Day) развија идеју о испирању кроз моторску кућицу, а касније Кок (Frederick Cocks) развија и унапређује идеју о двотактном мотору са разводом радне материје помоћу клипа (без вентила) - двотактни мотор какав данас познајемо.
- 1885: Дајмлер стиче патентна права за принцип натпуњења мотора СУС
- 1887: Бенц (Karl Benz) и Дајмлер користе клипни мотор СУС за погон аутомобила чиме започиње ера аутомобилизма и брзог развоја мотора СУС. Клипни мотор СУС постаје интегрални део Бенцовог патента за моторно возило (1886).
- 1890-3: Дизел (Rudolf Diesel) поставља теоријске поставке мотора са самопаљењем сопственом енергијом услед сабијања свежег пуњења и регулисаним ослобађањем топлоте при константном притиску (Дизел циклус). Патентна права стиче 1893.
- 1902: Рено (Louis Renault) добија патентна права за центрифугални компресор за натпуњење мотора СУС
- 1905: Швајцарац Бици (A. Buechi) добија патентна права за турбокомпресор
- 1908: Чедвик (Lee Chadwick) гради први тркачки натпуњени мотор и постиже брзину од 160 km/h!
- 1916: Рато (Auguste Rateau) први користи турбокомпресоре на авионским моторима Рено (Renault)
- 1925: Шведски инжењер Хеселман (Jonas Hesselman) први пут примењује принцип директног убризгавања бензина у цилиндар мотора са упаљењем помоћу варнице.
- 1936: Ванкел (Felix Wankel) патентира први ротациони мотор (принцип Ванкел).
- 1954-7: Ванкел и НСУ (NSU) реализују серију радних прототипова ротационог мотора по принципу Ванкел.

3. Класификација мотора СУС

Развој мотора током последњих 150 година довео је до реализације различитих варијанти клипних мотора које су, захваљујући бројним специфичностима, своје место нашле у разним областима, пре свега саобраћају, али и индустрији, пољопривреди итд. Класификација мотора може се извршити на више начина, са више аспеката узимајући у обзир бројне детаље у погледу конструкције, радног процеса, формирања смеше, сагоревања, примене итд. Уопштено, мотори СУС се могу класификовати на следећи начин:

а) према области примене:

за погон путничких возила, моторцикала, камиона, пољопривредне механизације, авиона, локомотива, бродова, генератора

б) према основним конструкцијским карактеристикама:

– са осцилујућим клипом/ клиповима (са разл. распоредом цилиндара: линијски, В, W, боксер, звездасти)

– ротациони (принципа Ванкел и сл.)

в) према радном циклусу (начину измене радне материје): 4-тактни и 2-тактни

г) према начину пуњења цилиндра: са природним пуњењем (усисавањем) и натпуњењем (механички компресор, турбокомпресор)

д) према начину упаљења смеше:

– мотори са упаљењем спољним извором - варницом (енг. Spark Ignition - SI),

– мотори са упаљењем енергијом сабијеног ваздуха (енг. Compression Ignition - CI)

ђ) према месту формирања смеше:

– са спољним формирањем смеше - карбураторски и мотори са убризгавањем горива у усисни канал (енг. Port Injection - PI)

– са унутрашњим формирањем смеше - убризгавањем горива у радни простор (енг. Direction Injection - DI, InDirect Injection - IDI)

е) према врсти коришћеног горива: бензински, дизел, гасни (компримовани природни гас, течни нафтни гас), алкохолни (метанол, етанол и њихове мешавине), водоник, био-горива, вишегориви мотори

ж) према начину хлађења: мотори хлађени течношћу, ваздухом, и мотори са комбинованим системом хлађења

з) према начину регулације оптерећења: променом количине пуњења цилиндра, променом састава смеше, комбинацијом претходна два начина регулације

4. Области примене мотора СУС

Примене и могућности мотора СУС су врло разнолике и вишеструке, што је последица чињенице да мотор СУС има јединствену способност рада у широком дијапазону радних режима и чињеници да користи горива високе енергетске густине. У укупној потрошњи енергије, мотори СУС, на светском нивоу, учествују са преко 25%. Када се говори о примени мотора СУС, прва асоцијација је саобраћај. И заиста, преглед статистичких података за потрошњу енергије на светском нивоу показује да у области сувоземног саобраћаја (путничка возила, моторцикли, масовни транспорт) клипни мотори СУС у свим својим варијантама и појавним облицима суверено владају (приближно 99%). У области воденог транспорта учешће је нешто мање, око 75%, док у области ваздушног саобраћаја, клипни мотори су готово потпуно потиснути током последњих 50 година увођењем млазних и турбопропелерних мотора (учешће испод 10%). Слични подаци се односе и на железнички саобраћај у коме суверено влада електрични погон, и анализе показују да ће се учешће клипних мотора СУС у овој области постепено смањивати даљом електрификацијом железничке мреже у свету.

5. Конструкција и принцип рада мотора СУС

У овом поглављу укратко ће бити приказан принцип рада и основни делови мотора СУС. Код класичног клипног мотора СУС (мотор са осцилујућим клипом) цилиндрични клип се креће у радном простору - цилиндру, принудно осцилујући под дејством кривајно-коленастог, односно клипног механизма. Овај вид конструкције је апсолутно доминантан у свим подручјима примене мотора СУС.

Конструкција клипног мотора СУС приказана је на сл. 2. Променљивост запремине радног простора остварује се посредством клипног механизма, чији су основни делови:

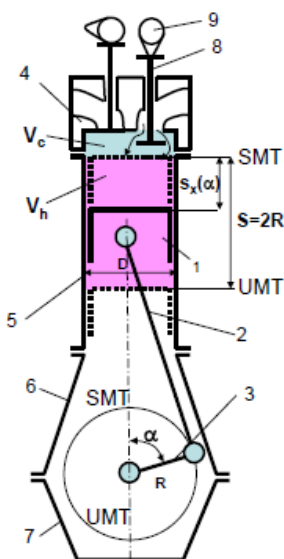
- клип (сл. 2, поз. 1), који чини покретно дно радног простора и прима силу притиска гасова у цилиндру;
- клипњача (поз. 2), која прима ту силу и претвара праволинијско кретање клипа у обртно кретање коленастог вратила;
- коленасто вратило (поз. 3), преко кога се развијени обртни момент предаје потрошачу (преносник, генератор ...).

Делови клипног механизма се крећу у оквиру основне структуре мотора коју чине главни непокретни делови мотора:

- цилиндарска глава (поз. 4), која затвара радни простор са горње стране, носи усисне и издувне канале, делове система развода, напајања и паљења;
- блок цилиндара (поз. 5) носи цилиндрице у којима се креће клип и са горњим кућиштем (поз. 6), затвара простор коленастог вратила са горње стране;
- доње кућиште мотора (корито мотора, поз. 7), које затвара мотор са доње стране и најчешће служи као spremnik средства за подмазивање.

Поред ових компонената, клипни мотор СУС поседује читав низ система и уређаја неопходних за исправан и поуздан рад, од којих су најважнији:

- систем развода радне материје - брегасто вратило (поз. 9), вентили (поз. 8), вентилске опруге ...
- систем подмазивања;
- систем хлађења;
- систем напајања горивом;
- систем за формирање смеше (убризгавањем или карбурацијом);
- систем паљења (код мотора са спољним упаљењем смеше);
- системи за стартовање мотора и генерисање електричне енергије;
- систем натпуњења (механички компресор или турбокомпресор);



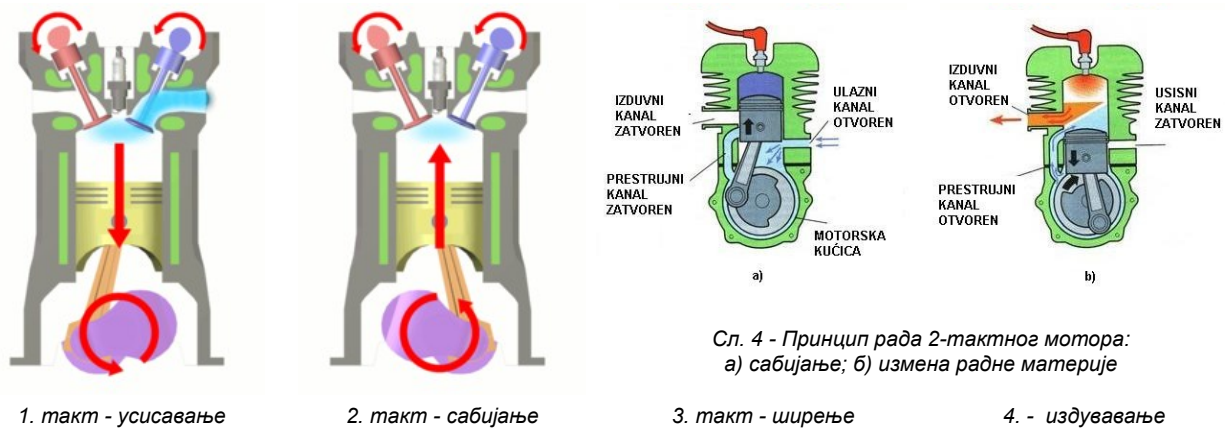
Сл. 2 - Шематски приказ клипног мотора СУС

Радни процес се обавља у простору који формирају цилиндар, клип и цилиндарска глава. Током циклуса клип се креће наизменично између два крајња положаја: спољне мртве тачке (СМТ), у којој је највеће растојање клипа од осе мотора, односно коленастог вратила - КВ) и унутрашње мртве тачке (УМТ) у којој је растојање клипа и осе мотора најмање. Њихово међусобно растојање представља ход клипа (S) током кога се обавља један такт. Радна запремина цилиндра (V_h) дефинисана је ходом клипа (S) и пречником клипа/цилиндра (D). Запремина радног простора цилиндра која остаје изнад клипа у СМТ, представља компресиону запремину (V_c), односно запремину коморе за сагоревање. Укупна запремина радног простора (V_u) једнака је збиру радне (V_h) и компресионе запремине (V_c). Степен сабијања мотора (Γ), представља једну од кључних моторских величина, а дефинисан је односом укупне и компресионе запремине:

$$V_u = V_h + V_c$$

$$\varepsilon = \frac{V_u}{V_c} = \frac{V_h + V_c}{V_c}$$

Принцип рада 4- тактног клипног мотора приказан је на сл. 3. Први такт представља усисавање свеже радне материје (пуњење). Током усисавања клип се креће од СМТ ка УМТ стварајући депресију у цилиндру, због чега свежа радна материја (смеша горива и ваздуха код бензинских мотора, односно ваздух код дизелмотора) прелазује из усисног система кроз усисни вентил у цилиндар мотора. Током другог такта, сабијања, клип се креће од УМТ ка СМТ, сабија свежу пуњењу и припрема га за сагоревање. Током сабијања радни простор је затворен (усисни и издувни вентили су затворени). Непосредно пред доласак клипа у СМТ, долази до паљења смеше - путем варнице код бензинских мотора, односно убризгавањем и самопаљењем код дизел мотора и њеног сагоревања у околини СМТ. Само сагоревање не представља засебан такт, већ процес који захвата крај такта сабијања и почетак такта ширења. Током трећег такта, ширења, цилиндарски простор је још увек затворен, продукти сагоревања се шире и делују на клип током кретања од СМТ ка УМТ. Трећи такт је једини радни такт током кога се енергија са гаса предаје клипу, односно клипном механизму, при чему се топлотна енергија трансформише у механички рад. Тако добијени механички рад користи се за савлађивање унутрашњих отпора у мотору (механички губици, измена и сабијање радне материје) и користан рад на коленастом вратилу (спољни отпор). Четврти такт је издувавање, током кога се клип креће од УМТ ка СМТ, смањује запремину и потискује продукте сагоревања кроз издувни вентил у издувни систем.. Доласком клипа у СМТ радни циклус мотора се завршава.



Сл. 4 - Принцип рада 2-тактног мотора:
а) сабијање; б) измена радне материје

1. такт - усисавање

2. такт - сабијање

3. такт - ширење

4. - издувавање

Сл. 3 - Приказ радног процеса 4-тактног мотора

Принцип рада 2-тактног мотора разликује се утолико што посебни тактови усисавања и издувавања не постоје, већ се ова два процеса одвијају готово истовремено и сразмерно краће него код 4-тактних мотора. Квалитет измене радне материје код 2-тактних мотора је лошији него код 4-тактних, и то има последице на ефективне параметре 2-тактних мотора. Детаљи и специфичности везане за радни процес 2-тактних мотора могу се наћи у литератури.

6. Радни параметри мотора

Најбољи начин да се сагледају могућности мотора СУС јесте анализа неких од радних параметара мотора, односно ефективних радних параметара, који показују учинак и ефикасност мотора као целине (број обртаја, ефективна снага, ефективни обртни момент, специфична ефективна потрошња горива, ефективни степен корисности). Перформансе мотора се данас крећу у невероватним распонима. Као примере можемо узети најмање и највеће међу њима. Најмањи, намењен погону авио модела има радну запремину од свега 0.03 cm^3 . Други екстремни пример је највећи до сада изграђен мотор, Wärtsilä-Сулзер двотактни дизел мотор за погон бродова радне запремине 25.5 m^3 . Основни технички подаци за ове моторе дати су у табели.

У погледу ефективног степена корисности (однос добијеног, ефективног рада и енергије добијене сагоревањем), клипни мотор СУС, упркос огромном техничком и технолошком напретку оствареном током 150 година развоја, не даје сјајне резултате. Ефективни степен корисности мотора је са скромних $5\div 10\%$ са почетка 20. века повећан вишеструко, и у категорији бензних мотора данас се креће у распону од $25\div 35\%$ (40%), док код дизел мотора достиже вредност од око 45% (горе поменути мотор RTA96-C достиже вредности од око 50%). У лабораторијским условима, на експерименталним моторима се током последњих 10 година тестирају нова техничка решења и постигнути су степени корисности од преко 50% и припремају се за увођење у масовну производњу. Иако на први поглед ови подаци делују обесхрабрујуће, јер укупни енергетски губици код просечног мотора СУС превазилазе 60% од укупне енергије добијене сагоревањем горива, клипни мотор СУС представља најефикаснију топлотну машину (примера ради, гасна турбина достиже степене корисности од око $30\text{-}35\%$). Ови подаци делују још импресивније ако се у обзир узме чињеница да се ради о високодинамичној топлотној машини, код које се процес одвија у екстремним динамичким условима, огромном брзином и у огромном распону радних режима (оптерећења се крећу у распону од $5\div 100\%$, а број обртаја мотора у распону од $10\div 100\%$).

Табела Т1

	Luhrs	Wärtsilä-Sulzer RTA96-C
тип мотора	ото, двотактни	дизел, двотактни
гориво	нитро-метан	дизел
радна запремина (Vh)	0.03 cm^3	25.5 m^3
ход клипа (S)	4.125 mm	2500 mm
пречник клипа (D)	3.175 mm	920 mm
еф. момент (Me)	N/A	7.6 MNm
еф. снага (Pe)	N/A	84.4 MW
макс. број обртаја (n)	$\approx 27000 \text{ min}^{-1}$	$\approx 92\div 102 \text{ min}^{-1}$

Анализирајмо то кроз податке о времену трајања радног процеса и вредностима основних термодинамичких параметара које се остварују током једног радног циклуса. Трајање циклуса код једног просечног 4-тактног дизел мотора је око 80 ms , при чему се притисак мења у распону од око $1:70$ ($p_{\text{max}} \approx 150 \text{ bar}$) а температура у распону од око $1:7$ ($T_{\text{max}} \approx 2300 \text{ K}$). Још фасцинантније делује податак да се слична трансформација одвија у тркачком 4-тактном мотору ($n_{\text{max}} \approx 18000 \text{ min}^{-1}$, мотор F1 нпр.) али за само 7 ms (подсећања ради, комплетан циклус обухвата процесе усисавања, сабијања, сагоревања/ширења и издувавања) при чему само сагоревање траје мање од 1 ms . Слична анализа се може приказати за мотоциклистички 2-тактни мотор, код кога цео циклус траје око 5 ms ($n_{\text{max}} \approx 12000 \text{ min}^{-1}$) при чему се рецимо, измена радне материје (код 2-тактних мотора пуњење и пражњење цилиндра се одвија готово истовремено) обави за око 2 ms .

7. Енергетска трансформација у мотору СУС

Анализа ефективних радних параметара (види претходно поглавље) показује, да се, без обзира на величину, брзоходост, намену мотора и начин одвијања радног процеса, на погонском вратилу добија тек нешто више од 30% енергије која се развија сагоревањем горива (Q_E). Зато је корисно размотрити где нестаје готово $2/3$ уложене енергије, како се губитак може смањити, да ли је тај губитак неповратан, и ако није, на који начин се та енергија може искористити. Значај ове анализе огледа се пре свега у чињеници да се цивилизација суочава истовремено са три кључна међусобно повезана проблема која могу утицати на њен опстанак: глобалним порастом потрошње енергије, глобалним загревањем и исцрпљивање необновљивих извора енергије (угљоводонична горива).

Енергетска трансформација у мотору СУС започиње сагоревањем горива, односно смеше ваздуха и горива. Енергија која се може добити сагоревањем дефинише се као производ масе горива (m_g) и његове доње топлотне моћи (H_d):

$$Q_1 = m_g \cdot H_d$$

Енергетски губици могу се приказати на следећи начин:

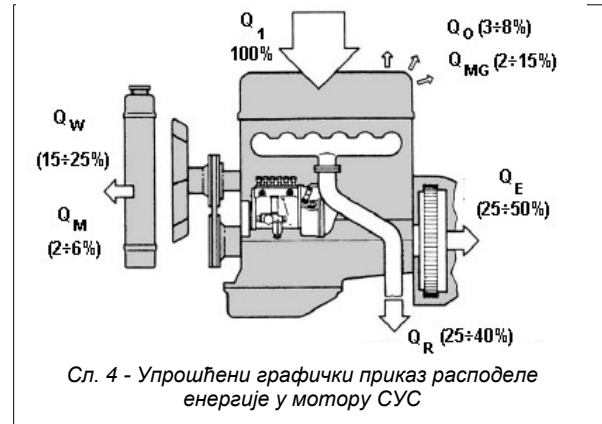
Q_R - енергија која се одведе издувним гасовима (представља разлику енталпија продуката сагоревања и енталпије свежег ваздуха на улазу у мотор). Код бензинских мотора представља 30÷40% укупне енергије Q_1 , док се код дизел мотора тај губитак креће у распону од 25÷30% због већег степена експанзије.

Q_W - енергија која се одводи средством за хлађење са делова мотора (да би се спречио пад механичких карактеристика материјала са порастом температуре и обезбедио оптимални термички ниво). Код бензинских мотора овај губитак се креће у распону од 20÷25%, а код дизел мотора 15÷20%.

Q_M - енергија која се одведе средством за подмазивање при његовом хлађењу. Овај енергетски губитак се креће у границама од 2÷4% код бензинских односно 2÷6% код дизел мотора.

Q_{MG} - енергија која се губи услед непотпуног сагоревања горива. Искоришћење горива, нажалост, није потпуно, и у зависности од врсте горива, начина формирања смеше и одвијања радног процеса, термичког нивоа итд., овај губитак износи 2÷15% код бензинских мотора, односно, око 2% код дизел мотора.

Q_O - остали енергетски губици услед незаптивености радног простора, зрачења и погона помоћних уређаја (износе око 3÷8%).



Сл. 4 - Упростиђени графички приказ расподеле енергије у мотору СУС

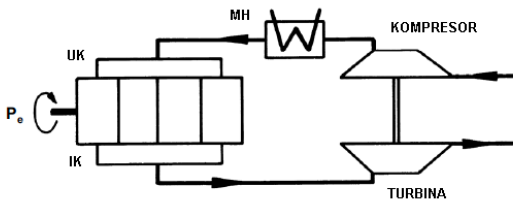
Глобални израз за енергетски биланс мотора тада гласи:

$$Q_1 = Q_E + Q_R + Q_W + Q_M + Q_{MG} + Q_O$$

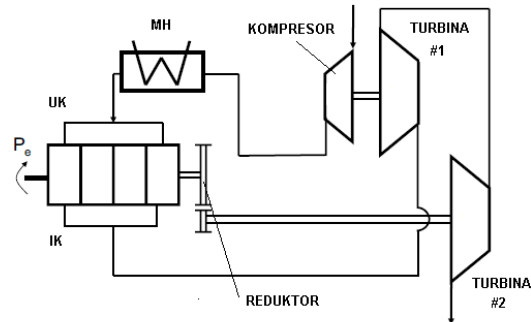
Овај израз може се интерпретирати и графички и приказан је на сл. 4.

8. Могућности побољшања ефикасности мотора СУС

Претходна анализа показује да код мотора СУС постоји огроман енергетски губитак, и да се за повећање ефикасности мотора морају развити и применити одређене технологије које би омогућиле искоришћење већег или мањег дела те енергије. Наведимо неке од начина на који се може искористити енергија издувних гасова:



Сл. 5 - Шематски приказ турбопуњења



Сл. 6 - Шематски приказ турбопуњеног компаунд мотора

- Натпуњење мотора помоћу турбопуњача представља један од основних и најједноставнијих начина за искоришћење енергије издувних гасова. Примена натпуњења отвара нове могућности за побољшање ефикасности мотора кроз смањење рада измене радне материје и повећање

механичког степена корисности мотора. Типичан пример примене турбопуњења са међухлађењем (МН) приказан је на сл. 5.

- Компаунд (сompound) мотор представља комбинацију клипног мотора и турбине у којој експандирају издувни гасови, а енергија која се предаје турбинском вратилу, преко одговарајућег преносника, враћа се коленастом вратилу мотора. Ово решење примењивано је на авионским моторима током 2. светског рата, а током последњих 10 година на овом решењу интензивно раде произвођачи дизел мотора (Scania, Volvo, Detroit Diesel). Степен корисности се може повећати за око 5%. Шематски приказ турбопуњеног компаунд мотора приказан је на сл. 6.
- Когенерација представља коришћење топлотне машине (гасне турбине или мотора СУС) за истовремено добијање електричне енергије (мотор погони електро-генератор) и топлотне енергије (енергија која се са мотора одводи издувним гасовима и системом хлађења се помоћу система измењивача топлоте користити за грејање резиденцијалних или индустријских објеката или за потребе технолошког процеса). Степен корисности таквог постројења (CHP - Combined Heat & Power) достиже и 90÷95%, али је примена ограничена на моторе стационарног типа. Ипак, поступак когенерације (у једном једноставнијем и мање ефикасном облику) може се демонстрирати и на сваком мотору за погон путничког возила. У зимском периоду, мотор и систем за грејање кабине функционишу као микро когенерационо постројење, при чему мотор обезбеђује погон возила, покеће алтернатор (генератор за пуњење батерије), а енергија одведена системом за хлађење користи се за грејање кабине. Когенерација је као поступак нашла место у директивама ЕУ (2004/08/EC), а на нивоу ЕУ, когенерацијом се обезбеђује у просеку 11% електричне енергије (у неким земљама и до 60%). У САД се планира експанзија когенерационих постројења и добијање до 20% укупно потребне електричне енергије до 2030. године.
- Термоелектрични генератор (TEG, ATEG, AETEG - Automotive Exhaust Thermo Electric Generator) представља једно од новијих решења за искоришћење енергије издувних гасова, а заснива се на Зебековом (Zeebeck) ефекту генерисања микроструја у проводнику чији су крајеви изложени различитим температурама. Основни мотив за примену ове идеје је делимична или потпуна замена алтернатора, чиме би се економичност могла повећати до 5%. Прва истраживања су обављена још 1966. а током '80-их и '90-их година на овом проблему радили су Porsche и Nissan. Последњих година развијена је технологија са измењивачима топлоте у којима се расхладна течност мотора користи за повећање температурског пада (Унив. Кларксон, САД).
- Развој система убризгавања горива и примена микропроцесора за управљање радом мотора у последњих 30 година снажно је утицао на побољшање ефикасности мотора СУС. Ово се односи на обе групе мотора, бензинске и дизел. Код дизел-мотора масовно се примењују акумулаторски системи убризгавања са електронском регулацијом и електромагнетним или пиезо-актуаторима за отварање бризгача, чиме се обезбеђује флексибилно управљање током убризгавања. Притисци убризгавања су повећани са око 800 bar (конвенционални системи) на 2000 bar (и више), чиме се побољшава атомизација горива и формирање смеше. Код бензинских мотора, ренесансу доживљава концепт директног убризгавања горива у цилиндар, што уз оптимизовано струјно поље омогућава рад мотора са сиромашном нехомогеном (слојевитом) смешом и побољшање економичности (смањење емисије CO₂). Примена ове технологије двотактне моторе чини поново интересантним (дуго запостављени због лоше измене радне материје и повећане токсичности), а интензивно се ради на концепту тзв. двотактно-четворотактних мотора код којих се начини одвијања радних процеса примењују и комбинују према радном режиму мотора (повољан обртни момент 2-тактног мотора у доњем подручју радних режима, боље карактеристике 4-тактног мотора у горњем подручју радних режима).
- Анализа показује да се знатно смањење енергетских губитака може добити уколико се смањи количина топлоте одведене системом хлађења, али то претпоставља примену нових врста материјала са повишеном термичком отпорношћу (керамике, нпр., побољшање ефикасности мотора од око 5÷10%).
- Термодинамичка анализа циклуса мотора СУС показује да продужена експанзија омогућава искоришћење веће количине енергије у цилиндру (први дефинисао Аткинсон применом продуженог хода у такту експанзије). У основи идеје се налази чињеница да се додатно повећање степена корисности може добити ако је однос степена експанзије и степена сабијања већи од 1. Практична реализација ове идеје омогућена је Милеровим патентом (Ралф Милер) који користи висок геометријски степен сабијања који, применом касног затварања усисних вентила омогућава смањење ефективног степена сабијања, чиме се услов за постизање продужене експанзије добија без конструкционих измена мотора. Овај концепт се захваљујући примени натпуњења данас доминантно користи на свим новопроизведеним моторима.

- Примена горива са ниским уделом угљеника (C), а посебно гасовитих горива (нпр. метан/компримовани природни гас – CH₄) даје гориву смешу чије су термодинамичке карактеристике ближе карактеристикама идеалног гаса. Такође, исти ефекат се постиже и применом сиромашне смеше.

9. Натпуњење мотора и "downsizing"

Натпуњење је наведено као једна од техничко-технолошких мера која утиче на побољшање перформанси мотоа СУС. Од првобитне идеје да се компресор користи са циљем да се повећа густина пуњења (маса свеже радне материје која стаје у цилиндар), па самим тим и обртни момент и снага мотора, прошло је пуно времена (Дајмлеров патент из 1885. године). Дизел мотор се не може замислити без турбопуњача, а анализе показују да се масовна примена натпуњења очекује и код бензинских мотора. У складу са новим изазовима који се стављају пред мотор СУС, ова идеја је еволуирала, и добила нови смисао - downsizing. Иза овог термина крије се читав низ мера које имају за циљ директно или индиректно, смањење потрошње горива односно смањење емисије CO₂. Идеја је једноставна и може се сагледати на следећи начин:

- применом натпуњења (пре свега турбопуњења) добија се побољшање обртног момента и снаге мотора при чему се укупна маса мотора незнатно повећава (додатак турбокомпресорске групе и међухладњака представља око 5% масе мотора, односно мање од 0.5% укупне масе возила);
- натпуњени мотор може заменити мотор двоструко веће радне запремине, и пропорционално веће масе, што у укупном билансу доводи до смањења масе возила од 5÷10%, односно смањења потрошње горива и емисије CO₂;
- натпуњени мотор има мањи рад измене радне материје, повољнији механички степен корисности и боље сагоревање (боља струјна слика и виши притисци и температуре у цилиндру) па је и укупна ефикасност мотора боља (други ниво смањења потрошње горива, мања емисија CO₂);
- радно подручје натпуњеног мотора мање запремине се налази у зони виших оптерећења где је економичност мотора боља (трећи ниво смањења потрошње горива и емисије CO₂).

Свакако, примена натпуњења има и одређена ограничења, од којих ћемо навести најзначајнија:

- код дизел мотора, високи притисци натпуњења доводе до термичког и механичког преоптерећења делова мотора (цил. глава, клипови, коленасто вратило);
- код бензинског мотора се као готово нерешив проблем јавља опасност од детонантног сагоревања, што захтева ограничење степена сабијања на $\Gamma = 9\div 11$, али се применом савремених система сагоревања (вишеструко убризгавање, слојевита смеша, разблажење смеше издувним гасовима и сл.) постижу услови за примену степена сабијања > 15 (нпр. систем сагоревања Mazda SkyActivX, SACI – Spark Assisted Compression Ignition, HCCI – Homogenous Charge Compression Initiation);
- ефикасан рад катализатора изискује његово приближавање цилиндарској грани, што значи да и група турбопуњача мора бити постављена непосредно уз издувни колектора, а то значи излагање турбине екстремно високим температурама (преко 1000 °C на номиналном режиму код бензинских мотора).

Управљање турбопуњеним мотором, флексибилна регулација притиска пуњења, примена нових термоотпорних легура за израду турбинског кола, развој турбина променљиве геометрије, примена турбокомпресора са електро-мотором (е-боост системи) примена двостепеног натпуњења и комбинованих система натпуњења са механичким и турбокомпресором, само су неки од изазова који се постављају у развоју натпуњених мотора.

10. Перспективе развоја и примене мотора СУС

Упркос чињеници да се ресурси угљоводоничних горива постепено смањују и да свим видовима топлотних машина које користе ова горива прети опасност изађу из употребе, клипни мотори СУС и даље представљају основни вид примарног погонског агрегата, посебно у домену саобраћаја. Пројекције које дају угледни аналитичари указују на то да се у скорој будућности, упркос огромном публицитету који прати неке алтернативне технологије (Е-погон, горивне ћелије, нпр.) не види јасно прави наследник мотора СУС. проф. Хејвуд (J. Heywood) са технолошког Института у Масчусетсу (MIT) даје следећу пројекцију:

- еволутивни напредак на пољу бензинских мотора са постепеним побољшањем од око 1÷2% на годишњем нивоу;
- побољшање економичности код дизел мотора од око 15%, релативно у односу на бензинске моторе, али уз значајно више трошкове развоја;
- примена хибридног погона (паралелни) обезбеђује побољшање економичности од око 30% у односу на решења без хибридног погона (градски саобраћај), али уз повећање трошкова од 20%;
- гориве ћелије изискују снабдевање одговарајућом врстом горива и у том случају очекује се побољшање економичности од око 30% у односу на еквивалентни хибридни погон, док би имплементација циклуса за генерисање водоника ту предност практично анулирала.

Табела Т2 пружа слику о временском интервалу коме се очекује примена и ширење одређених технологија за побољшање економичности мотора (Heuwood, 2003). У прилог овоме говоре и актуелни подаци водећих произвођача возила на хибридни погон (Toyota, Honda), да је у 2020. години нпр. учешће овог типа возила на глобалном нивоу приближно 1%.

Табела Т2

	Бензински натпуњени мотор са директним убризгавањем (downsized)	Брзоходи дизел мотор са директним убризгавањем, хватачем честица и NOx катализатором	Хибридни погон са бензинским мотором	Возило са горивом ћелијом и резервоаром за водоник
Возило конкурентно на тржишту	~ 3 год.	~ 3 год.	~ 3 год.	~ 10÷15 год.
Примена на новопроизведеним возилима	~ 10 год.	~ 10÷15 год.	~ 15 год.	~ 25 год.
Примена у флоти возила	~ 10 год.	~ 10÷15 год.	~ 10÷15 год.	~ 20 год.
Укупно време за примену технологије	~ 20 год.	~ 25 год.	~ 30 год.	~ 50 год.
Година када се очекује значајан тржишни утицај	2025	2030	2035	2050

Од интересантних технологија чија је примена већ почела или се очекује поменућемо неколико:

а) примена алтернативних горива

- течног нафтног гаса (LPG, мешавина пропана и бутана) - боље еколошке карактеристике, боље формирање смеше, боље антидетонантне карактеристике, лака манипулација, примена на постојећим моторима без радикалних реконструкција (на тржишту су доступни двогориви мотори на бензин и LPG)
- компримованог нафтног гаса (CNG, 95% метана) - одличне еколошке карактеристике, боље формирање смеше, боље антидетонантне карактеристике уз отежану манипулацију и складиштење (експлозивност, складиштење под високим притиском)
- алкохоли - етанол, метанол и њихове мешавине са моторним бензинима - побољшане еколошке и антидетонантне карактеристике, примена на постојећим моторима без радикалних реконструкција, нерешен проблем производње уколико је учешће у мешавини са моторним бензинима веће од 15%
- водоник - супериорно гориво у погледу енергетског потенцијала и еколошких карактеристика (продукт сагоревања је вода), али суштински недостатак представља производња, складиштење и дистрибуција (експлозивност у додиру са кисеоником, захтева примену криогених поступака за складиштење у течном стању)

б) хибридни погон - у општем случају, појам се односи на примену два различита извора снаге. Најчешће, хибридни погон код возила односи се на комбинацију мотора СУС и електричног мотор-генератора и батерије за акумулацију електричне енергије. Позната су следећа принципијелна решења:

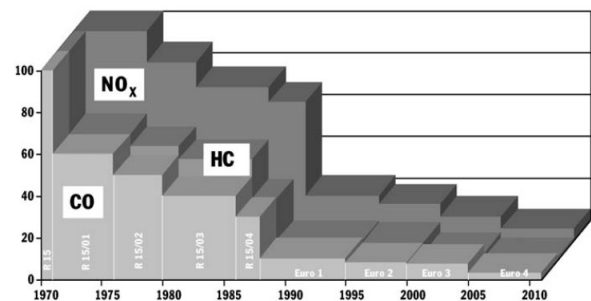
- Код паралелног хибридног погона, мотор СУС се користи за погон возила и електричног мотор-генератора (ЕМГ). Током успоравања, ЕМГ ради као генератор, док током убрзавања возила, ЕМГ ради као електро-мотор, користећи електричну енергију из батерије, а погон возила се тада, зависно од потреба обезбеђује радом једног или оба расположива покретача (електро-мотор и мотор СУС). Пренос снаге на погонске тачке обавља се преко одговарајућег варијабилног преносника (редуктора), чиме се маса возила не смањује. Ова технологија у различитим варијантама (Full Hybrid, Mild Hybrid, Plug-In Hybrid итд.) комерцијално је доступна и очекује се њен даљи развој и пробој на тржишту.

- Код серијског хибридног погона, приступ је једноставнији, где мотор СУС директно погони електро-генератор и тако обезбеђује допуну батерије, а погон возила се обезбеђује електро-мотором који се напаја из батерије. У овом случају директна веза мотора СУС и погонских точкова не постоји, па не постоји ни потреба за преносним системом (мењачки преносници, редуктори ...). У том случају се може говорити о смањењу укупне масе возила, и индиректном утицају на смањење потрошње горива. Мотор СУС се тада користи у уском подручју радних режима (оптимална подешавања за високу економичност и ниску токсичност). Пример оваквих решења су локомотиони мотори, системи за погон тешке механизације (рударски копови).

в) хибридни погон са пнеуматским мотором - инересантна идеја која последњих година заокупља све више пажње, а односи се на мотор СУС који у посебним режимима рада (принудни празан ход, кочење) функционише као клипни компресор и допоњује боцу са ваздухом под притиском. У режимима убрзања, компримовани ваздух из боце се води до цилиндара истог мотора у којима експандира вршећи механички рад (принцип који се користи за пнеуматско стартовање мотора великих запремина, нпр.). Развојем ових технологија бави се француска компанија МДИ (патентна права преузела је већ индијска мултинационална компанија ТАТА), а слична решења развијена су и на Техничком Универзитету у Цириху током 2008 године. Побољшање економичности је око 30% (еквивалентно електричном хибридном погону) али уз значајно мање трошкове реконструкције (око 20% у односу на око 200% за електрични хибрид).

11. Економски, друштвени и еколошки аспекти развоја мотора СУС

Тежња за слободом дубоко је укореењена у свима нама, а један од многих њених аспеката је слобода кретања. *Citius, altius, cellerius* - даље, више, брже - речи су које описују оно у нама што нас нагони вековима да развијамо и побољшавамо своју покретљивост. Данас је мобилност кључна за развој и опстанак савременог друштва. Одлазак до посла или школе, спорт, путовање, забава, добра и услуге које су нам неопходни, неки су од аспеката овог феномена. Мобилност нам омогућава и да досегнемо и постигнемо све оно што у свом блиском окружењу можда нисмо у стању.



Сл. 9 - Развој регулативе за контролу токсичне емисије мотора у ЕУ у периоду 1970-2010

Тежња ка кретању и бројни изуми, техничка и технолошка решења која су нам омогућила да задовољимо ту потребу, изазвале су огромне друштвене, економске, али нажалост и еколошке промене, посебно током 20. века. Прекратницу представља, свакако, 1887. година и појава првог возила са мотором СУС. Развој моторног саобраћаја и мотора СУС као основног покретача имале су и имају огроман утицај на развој друштва у свим аспектима, и може се рећи да и данас ауто и мото индустрија представљају кључну покретачку снагу сваког друштва и цивилизације у целини.

Позитиван тренд у развоју ове индустријске групације евидентан је и непрекинут током последњих 150 година, а само током последњих 15 година број произведених возила и мотора у свету повећан је за 25% (са око 49 на преко 62 милиона јединица). Утицај транспорта на потрошњу енергије и екологију је, разумљиво, огроман (око 25% укупне светске потрошње енергије, нпр.). Зато ауто-мото индустрија улаже огромне напоре на финансијском, техничком и научном плану како би се економичност и еколошке карактеристике мотора и возила побољшале. Само током последњих 40 година, токсичност издувне емисије смањена је и до 95% (преглед по компонентама, према регулативи ЕУ, сл. 9).

У развој сваке нове платформе (возило и мотор) улаже се 1+2 млрд. \$, а најновији пример даје групација Hyundai-Kia која улаже 3 млрд. \$ само у развој новог хибридног погона са мотором СУС на природни гас. Сличан пример се може наћи и у сектору производње малих мотора за погон лаке механизације - групација Briggs-Stratton са годишњим обртом већим од 1 млрд. \$ и профитом од око 300 мил. \$.

12. Мотор СУС, Е-горива и Е-мобилност

Другу деценију 21. века обележава глобална иницијатива за смањење употребе угљо-водоничних горива која се осим у производњи енергије и индустрији користи и за погон мотора СУС. Електрификација саобраћаја ће омогућити смањење потрошње угљоводоничних горива и смањење емисије угљен-диоксида (CO_2). Међутим, електрификација (прелаз на батеријски електрични погон) сама по себи не обезбеђује испуњење основног циља – смањење потрошње угљоводоничних горива и смањење емисије (CO_2) уколико је електрична енергија добијена управо из тих извора, што је данас доминантан случај. Такође, примена електричног погона је ограничена на одређене сегменте саобраћаја (нпр. индивидуални путнички саобраћај, јавни градски превоз, возила комуналних служби), али уз озбиљна ограничења, од којих можемо навести само она најважнија:

1. време пуњења батерије,
2. расположиви радијус кретања,
3. радни века батерије,
4. изградња инфраструктуре и
5. обезбеђење додатних капацитета за производњу електричне енергије.

Са друге стране, масовни транспорт људи и добара, било друмски и водни, који је у укупној потрошњи енергије у саобраћају доминантан, није виђен за масовну примену електричног погона због бројних технолошких ограничења која су у односу на примену електричног погона у индивидуалном путничком саобраћају још већа и озбиљнија.

Овome треба додати и чињеницу да у сектору пољопривредне и грађевинске механизације, електропогон уопште није препознат као алтернатива.

У том смислу, мотор СУС, али са новим врстама горива, остаје главни облик примарног покретача у друмском и водном саобраћају. Ниско угљенична горива (нпр. метан CH_4 , алкохоли – метанол и етанол), а посебно водоник, добијају нови значај. Синтетичка горива и тзв. Е-горива (E-Fuel) са нултим или минималним угљеничним отиском у процесу производње, чиниће у будућности основу за примену мотора СУС.