

UDK 534.83:62-135

Razpoznavanje in zmanjševanje hrupa turbostrojev

MIRKO ČUDINA

(Nadaljevanje in konec)

3. VRSTE HRUPA

Pri razpoznavanju virov hrupa ni zadosti ugotoviti samo raven zvočne moči vira, ampak tudi naravo emitiranega hrupa oziroma njegov izvor. Pri turbostrojih (črpalkah, kompresorjih in ventilatorjih), ki jih žene elektromotor, ter turbinah, ki ženejo generator, je lahko hrup glede na izvor *aerodinamični* oz. *hidrodinamični*, *mehanski* in *magnetni* [6]. Aerodinamični hrup se nanaša na stroje s plinastim medijem, hidrodinamični hrup pa na stroje s tekočinskim medijem.

Aerodinamični hrup povzročajo velike pretočne hitrosti in nestacionarni tok plina ter interakcije plinskega toka s togimi telesi. V področju podzvočnih hitrosti toka nastane aerodinamični hrup v eni od treh oblik aerodinamičnih virov, in sicer kot monopol, dipol ali kvadropol.

Aerodinamični monopol zvočnega sevanja plinskega toka nastane, če se dovaja masa ali toplota v fluid pri nestacionarnem toku. Tipični monopolni viri so pulzirajoči curki, sirene, propelerji pri ničelnem naklonskem kotu lopatic itd. Zvok monopola je usmerjen v obliki krogle.

Aerodinamični dipol nastane, če je tok plina v interakciji s togim telesom, ki povzroča nestacionarne sile. Tipični dipolni viri so turbostroji (turbine, črpalke, kompresorji, ventilatorji), kjer je turbulentni tok v interakciji s statorskimi ali rotorskimi lopaticami (dobimo izrazito visoke amplitude hrupa pri osnovni frekvenci vrtenja lopatic rotorja, ki je proporcionalno s številom lopatic z in vrtilno hitrostjo rotorja n ; $f = z n$), pri propelerjih, pri katerih naklonski kot lopatic ni nič, pri toku plina skozi rešetko ali ventile itd. Usmerjenost zvoka dipola je v obliki osmice ali dveh sosednjih monopolov.

Aerodinamični kvadropol povzroča viskozna napetost znotraj turbulentnega toka plina brez motenj. Kvadropol je lahko zaradi delovanja dveh dipolnih virov, ki sevajo s faznim zamikom 180° . Tipični primeri kvadropolov so tokovi plina z veliko nadzvočno hitrostjo turbulentnega zvočnega toka, pri turbopotisnikih ipd. V področju podzvočne hitrosti ($Ma < 1$) je učinek kvadropolnega sevanja manjši od dipolnega. Usmerjenost kvadropola je v obliki štiriperesne detelje.

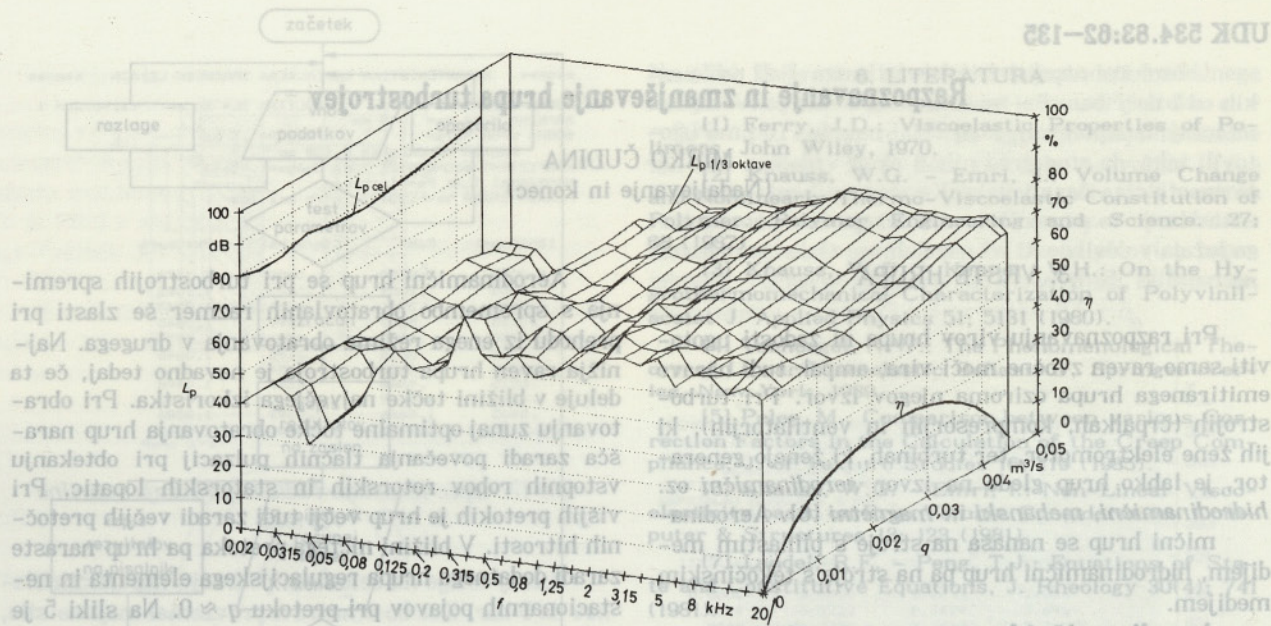
Celotna moč sevanja monopola je proporcionalna s četrto potenco pretočne hitrosti, dipola s šesto potenco in kvadropola z osmo potenco pretočne hitrosti. Aerodinamični hrup je običajno širokopasovni in se navadno prenaša s tokom plina ali po zraku.

Aerodinamični hrup se pri turbostrojih spreminja s spremembo obratovanih razmer še zlasti pri prehodu iz enega režima obratovanja v drugega. Najnižja raven hrupa turbostroja je navadno tedaj, če ta deluje v bližini točke največjega izkoristka. Pri obratovanju zunaj optimalne točke obratovanja hrup narasča zaradi povečanja tlačnih pulzacij pri obtekanju vstopnih robov rotorskih in statorskih lopatic. Pri višjih pretokih je hrup večji tudi zaradi večjih pretočnih hitrosti. V bližini ničtega pretoka pa hrup naraste zaradi dodatnega hrupa regulacijskega elementa in nestacionarnih pojavov pri pretoku $q \approx 0$. Na sliki 5 je prikazan primer tridimenzionalne predstavitve emitiranega hrupa turbopuhala (sesalne enote ISKRA 1000 W) pri 1/3-oktavnem frekvenčnem pasu in pri različnih obramenitvah. Poleg spektra hrupa vidimo na levi strani slike 5 tudi celotno raven hrupa, na desni pa njegov izkoristek v funkciji pretoka. Na sliki 5 vidimo tudi izrazite diskretne frekvence vrtenja lopatic in njihovih harmonikov [4, 7, 8].

Mehanski hrup nastaja zaradi trenja in periodičnih udarcev v ležajih, tesnilih, gonilih, ščetkah elektromotorjev itd. Mehanski hrup je tudi zaradi vibracij, ki nastanejo pri slabem uravnoteženju rotorskega paketa turbostroja in elektromotorja ali slabi montaži. Mehanski hrup zaradi vibracij je lahko zelo izrazit pri rezonanci. Mehanski hrup se prenaša prek ležajev, nosilnih opor ali priključnih cevovodov na strukturo, na kateri je stroj obešen oziroma zvezan, tako da se ta prenaša naprej po strukturi kot *strukturni hrup*.

Mehanski hrup se spreminja s spremembo režima obratovanja, predvsem s spremembo vrtilne hitrosti. Pri večjih vrtiljajih je hrup, zaradi trenja in periodičnih udarcev, večji. Pri spremembi obremenitve turbostroja se spremenijo radialne in aksialne sile, ki delujejo na rotorski paket in s tem tudi na aksialne in radialne ležaje. Na mehanski hrup močno vpliva vrsta ležajev (drsní ali kotalni), vrsta ozobja zobnikov (cikloidno, evolventno, s poševnimi/z ravnimi zobmi, polžasta dvojica), izvedba ščetk in komutatorja elektromotorja, vrsta tesnilk (drsní, labirintne) itd. Mehanski hrup ima običajno nižjo raven kot aerodinamični hrup, razen v skrajnih primerih rezonance.

Magnetni hrup povzročajo periodične sile, te pa spremembe magnetnega polja med statorjem in rotorjem elektromotorja. Na magnetne sile vplivajo mnoge mehanske in elektromagnetne lastnosti kompleta statorja in rotorja elektromotorja, npr.: število in velikost utorov v statorskem in rotorskem paketu, izsrednost zračnih reg, način navitja polov, število navojev v utorih itd. Tudi magnetni hrup se spreminja



Sl. 5. Spekter hrupa pri 1/3 -oktavnem pasu in različnih pretokih dvostopenjskega turbopuhala
 L_p - raven zvočnega tlaka, f - frekvence, q - pretok, η - izkoristek

s spremembo režima obratovanja, saj so pri večji obremenitvi večji tokovi. Spekter magnetnega hrupa je značilno širokopasoven z večjim delom v slišnem področju. Magnetni hrup je navadno precej manjši od mehanskega in aerodinamičnega hrupa. Magnetni hrup jasno slišimo samo, če ni aerodinamičnega in mehanskega hrupa, npr. pri transformatorjih in stabilizatorjih napetosti.

Pri črpalkah, kompresorjih in ventilatorjih, ki jih ženejo elektromotorji, ter turbinah, ki ženejo generator, se hkrati pojavljajo aerodinamični, mehanski in magnetni hrup. Delež posameznih tipov hrupa je odvisen od tipa in dimenzij stroja, vrtilne hitrosti, obratovalnih razmer, kakovosti izdelave in montaže, obrabljenosti stroja, stanja okolice itd.

Nastali hrup se lahko širi do poslušalca po zraku ali po delih sistema oziroma po strukturi. Zvok, ki se širi po zraku, imenujemo *zračni hrup*, tistega, ki se širi po strukturi, pa *strukturni hrup*.

4. ZMANJŠEVANJE HRUPA

Potem, ko smo razpoznali vir hrupa, se lotimo analize mogočih ukrepov za zmanjševanje hrupa. Najprej ugotovimo največjo še dopustno raven hrupa. Iz razlike izmerjene ravni hrupa in vnaprej določenega dobimo vrednost, ki jo moramo doseči ali celo preseči za uspešno izvedbo naloge. Pri tem je pomembno, ali moramo zmanjšati raven hrupa za tako definirano vrednost z enakomernim zmanjšanjem ravni hrupa pri vseh frekvencah ali pretežno v območju nizkih ali pretežno v območju visokih frekvenc oziroma srednjih frekvenc. To je pomembno, ker je zmanjševanje hrupa v območju nizkih frekvenc mnogo težje kakor v območju visokih frekvenc [2].

Poglavitno pri vseh poskusih za zmanjšanje hrupa mora biti: čim manjši stroški za izvedbo predloga, ohraniti ali izboljšati obratovalne značilnosti stroja ali naprave, ohraniti stopnjo varnosti in prilagodljivost stroja, ohraniti težo in prostornino. Pri izdelavi predlogov moramo upoštevati veljavni in možni tehnološki proces v posamični in serijski izdelavi pri izdelovalcu stroja ali naprave, homologacijske, energetske, ekonomske, ekološke zahteve itd. [9].

V praksi poznamo dva različna načina za zmanjševanje hrupa [10]:

1. zmanjševanje hrupa pri viru - primarni način in
2. zmanjševanje hrupa v sistemu - sekundarni način.

Pri primarnem načinu skušamo zmanjšati hrup, npr. pri turbostrojih;

a) z izboljšanjem aerodinamične oblike pretočnega polja turbostroja, s pravilnim oblikovanjem lopatic, vodilnikov, prehodov, ostrih robov, z neenakomerno delitvijo lopatic rotorja, z večločno izvedbo lopatic z naklonskim kotom lopatic pri aksialnih strojih itd. [6, 7, 8, 11];

b) s pravnim radialnim ohlapom med zunanjim premerom rotorja in jezičkom spirale ter aksialnim ohlapom med lopatico odprtega rotorja in okrovom turbostroja [6, 12] ali pa s pravilnima radialnim in aksialnim ohlapom med rotorjem in statorjem pri aksialnih turbostrojih [15];

c) z ustrezno izbiro materiala za stroj ali napravo, npr. viskoelastični materiali in nekatere zlitine mangana in bakra z ugodnimi dušilnimi lastnostmi, protizvočne plasti (folije), premazi itd.;

č) s pravilno izbiro tipa stroja in obratovalnih razmer, s pravilno izbiro dimenzij stroja [10, 12, 13];

d) z zmanjšanjem obratovalnega tlaka;

e) z zmanjšanjem vrtilne hitrosti [11, 15];

f) z obratovanjem črpalke ali vodne turbine zunaj kavitacijskega področja ali kompresorja pri majhnih vrednostih Machovih števil ($Ma < 0,4$);

g) s pravilno izbiro mesta vgradnje in pravilno montažo;

h) s pravilno izbiro obratovalnih razmer, stran od meje črpanja [11, 15] itd.

Znano je, da hrup pri osnovni frekvenci lopatice rotorja in njenih višjih harmonikah znaša približno 90 odstotkov celotne energije hrupa, zato si prizadevamo zmanjšati prav hrup lopatice. Zmanjšamo ga lahko s pravilno obliko pretočnega polja, z neenakomerno delitvijo lopatic, z zmanjšanjem vrtilne hitrosti, s povečanjem ohlaja med rotorjem in jezičkom spirale (v mejah med 5 do 10 %), z zmanjšanjem obratovalnega tlaka, s postavitvijo obratovalne točke v področje največjega izkoristka itd.

Pri sekundarnem načinu poskušamo zmanjšati hrup v sistemu, pred ali za turbostrojem:

- a) z vgraditvijo absorpcijskega glušnika,
- b) z vgraditvijo ekspanzijske komore [14],
- c) z vgraditvijo Helmholtzovega rezonatorja,
- č) z vgraditvijo elastične cevne zveze, elastičnih gumijastih ali vzmetnih podstavkov,
- d) z oklepanjem v posebne oklepe ali vgraditvijo v protizvočne kabine, komore ali sobe,
- e) z vgraditvijo ovir, sten, absorpcijskih ali deflektorskih sten itd.

Neposredna kovinska zveza stroja s podlago ali s sistemom cevovoda prenaša hrup na nosilno konstrukcijo ali cevni sistem, ki se naprej širi kot strukturni hrup. Zato je zelo pomembno, da odpravimo strukturni hrup s pravilnim vzmetenjem in ustreznimi elastičnimi cevnimi vezmi. Vgraditev Helmholtzovega rezonatorja je uspešna samo pri stacionarnih vrtiljajih, ekspanzijska komora je glede tega manj občutljiva, medtem ko je vgraditev absorpcijskega glušnika lahko celo škodljiva, saj pomeni dodatni upor v sistemu, kar v nekaterih primerih lahko povzroči večjo porabo energije in celo večji hrup [10].

V zadnjem času se srečujemo s tretjim načinom, t. im. aktivnim zmanjševanjem hrupa, ki temelji na načelu emitiranja protizvoka enakega spektra, kakršen je spekter vira hrupa. Zvok zvočnega vira najprej posnamemo z mikrofonom, nato s fazno zamaknitvijo reduciramo kot protizvok prek zvočnika, ki je v toku za mikrofonom. Zaradi interference obeh zvočnih valovanj se hrup zmanjšuje, vendar samo pri stacionarnih režimih obratovanja. S spremembo vrtiljajev stroja ta način odpove ali pa se hrup lahko celo ojači, če nima ustrezne nadzorne enote. Način se z uspehom uporablja za zmanjševanje hrupa prezračevalnih sistemov in stabilnih dizelskih motorjev za pogon agregatov. Ta način je trenutno zelo pereč in se hitro razvija.

Sekundarni način zmanjševanja hrupa je v načelu slabši, čeprav je pogosto učinkovitejši in za izvršitev najhitrejši. Prizadevati si moramo za primar-

ni način zmanjšanja hrupa pri samem viru, saj je zmanjševanje hrupa v sistemu (sekundarni način) praviloma zvezano z dodatno porabo energije ali materiala, prostora ali pa z večjimi izdelovalnimi stroški, medtem ko je metoda aktivnega zmanjševanja hrupa zelo dobra pri stacionarnih režimih obratovanja in v kombinaciji z glušniki. Aktivno zmanjševanje hrupa je namreč primerno za nizke frekvence, glušniki pa za visoke. Pri spremenljivih režimih obratovanja pa je za učinkovito aktivno dušenje hrupa potrebna ustrezna kontrolna enota.

Hrup nastaja tudi v sistemu (ceveh, krivinah in armaturah) zaradi trenja in turbulence toka. Pri tem je prevladujoč hrup zaradi turbulence zlasti v bližini armatur. Pri črpalnih in turbinskih sistemih nastaja hrup tudi zaradi kavitacije v ventilih in zaradi pojava vodnega udara. Hrup, ki je nastal v sistemu, zmanjšamo z zmanjšanjem turbulence oziroma z zmanjšanjem pretočne hitrosti. Hitrost toka zmanjšamo, če povečamo premer cevovoda. Hrup zaradi armatur in kavitacije pa zmanjšamo, če zmanjšamo število armatur in povečamo njihove odprtine. Hrup zaradi vodnega udara zmanjšamo s postopnim zapiranjem regulacijskih elementov, vgradnjo vodne komore itd.

Hrup turbostroja je v ozki povezavi s hrupom sistema. Z večje razdalje jih medsebojno ne ločimo in jih pogosto obravnavamo kot celoto.

5. SKLEP

Hrup je civilizacijski problem, ki ogroža dobro počutje ljudi v bivalnem in delovnem okolju. Zato je naša naloga, da skrbimo za njegovo zmanjšanje na sedanjih in na novo snovanih postrojih, ki povzročajo hrup. Da bi lahko prispevali svoj delež, moramo poznati osnovne značilnosti zvočnega valovanja, moramo vedeti, kako, kje in zakaj prihaja do nastanka hrupa, kako se ta širi do človekovega ušesa in predvsem, kako ga zmanjšati. Da bi se lotili te naloge, moramo najprej razpoznati vir hrupa, to je, določiti moramo njegovo zvočno moč in natančno mesto. Poleg tega moramo ugotoviti njegov izvor, to je, ali gre za aerodinamični, mehanski ali magnetni vir hrupa. Pri razpoznavanju vira hrupa najpogosteje uporabljamo metodo merjenja zvočnega tlaka ali novejšo metodo merjenja zvočne intenzivnosti. Pri tem lahko merimo zvočni vir na mestu instalacije stroja ali v specialnem testnem polju (gluhi ali odmevni sobi). Za natančne laboratorijske meritve je pri metodi merjenja zvočnega tlaka potrebno specialno testno polje, medtem ko pri metodi merjenja intenzivnosti to ni potrebno. Pri ugotavljanju izvora vira hrupa je potrebna nadrobnejša analiza zvočnega vira in precejšnje znanje tako o zvočnem valovanju kakor o stroju, ki povzroča hrup.

Pri izdelavi predloga za zmanjšanje hrupa moramo skrbeti, da predlagana rešitev ne vpliva na spremembo obratovalnih razmer, na večjo porabo energije,

prostora in stroškov ali pa na zanesljivost in varnost obratovanja. Prizadevamo si najprej za zmanjšanje hrupa pri viru (primarni način), šele nato za aktivno dušenje hrupa ali za sekundarni način zmanjšanja hrupa v sistemu. Pri tem je treba računati, da ni vedno medsebojne povezave med včasih velikanskimi vloženi sredstvi in razmeroma majhnim zmanjševanjem hrupa.

6. LITERATURA

- [1] Beranek, L.L.: Noise and Vibration Control. Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1971.
- [2] Harris, C.M.: Handbook of Noise Control, Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1979.
- [3] Warring, R.H.: Handbook of Noise and Vibration Control. Trade and Technical Press Ltd. Marden Surrey, England, 1969.
- [4] Čudina, M., Steržaj, M.: Identifikacija izvora buke usisne jedinice za usisivač prašine. Zbornik saopštenja X. Jug. i medjunarodnog savetovanja "Zaštita od buke i vibracija u životnoj i radnoj sredini", Beograd, 1987.
- [5] Čudina, M.: Laboratorijska ispitivanja buke u gluhoj komori, Zbornik radova VIII. Jugoslovenskog savetovanja "Zaštita od buke i vibracija u životnoj i radnoj sredini", Beograd, 1985.
- [6] Čudina, M.: Noise Sources of a Centrifugal Pump. Conference HIDROTURBO '89 Brno, 1989.
- [7] Čudina, M., Steržaj, M., Kavčič, J.: Noise Analysis of a Vacuum Cleaner Suction Unit. NOISE-CON 87. State College, Pennsylvania, 1987.

[8] Čudina, M., Steržaj, M., Kavčič, J.: Noise Sources in a Vacuum Cleaner Suction Unit, INTER-NOISE 88, Avignon, Francija, 1988.

[9] Čudina, M., Kompare, M., Kavčič, J., Krajnik, J.: Zmanjšanje hrupa pri sesalnikih za prah. Zbornik del IV. Posvetovanja o varstvu pred hrupom in vibracijami, Ljubljana, 1984.

[10] Čudina, M., Kompare, M., Kavčič, J., Krajnik, J.: Redukcija buke u sistemima za otprašivanje. Zbornik saopštenja VIII. Jug. savetovanja zaštite od buke i vibracija u životnoj i radnoj sredini, Beograd, 1985.

[11] Čudina, M., Trenc, F.: Optimisation of the Engine Cooling Fan with regard to its Performance and Noise. 13th International Congress on Acoustics, Beograd, 1989.

[12] Čudina, M., Steržaj, M.: Noise Reduction of a Centrifugal Pump. NOISE-CON 88. West Lafayette, Indiana, 1988.

[13] Čudina, M., Steržaj, M.: Uticaj dimenzije rotora na emitiranu buku radialne turbo pumpe. Zbornik saopštenja X. Jug. i medjunarodnog savetovanja Zaštita od buke i vibracija u životnoj i radnoj sredini, Beograd, 1987.

[14] Klemenčič, S., Čudina, M., Kompare, M.: Zmanjšanje hrupa sesalne enote z ekspanzijsko komoro. Zbornik del V. Posvetovanja varstvu pred hrupom in vibracijami, Ljubljana, 1986.

[15] Čudina, M., Trenc, F., Steržaj, M.: Noise Control of the Engine Cooling Fan. INTER-NOISE 89. Newport Beach, California, 1989.

Avtorjev naslov: doc. dr. Mirko Čudina, dipl. inž.
Fakulteta za strojništvo,
Ljubljana

Dvotaktni motor, nekoliko drugače

RADISLAV PAVLETIČ

1. UVOD

Kmalu po Ottovem izumu štiritaktnega motorja z notranjim zgorevanjem se je pojavila zamisel o dvotaktnem motorju in oba sta se od tedaj naprej razvijala drug ob drugem. Zanimanje zanju je nihalo, nekaj časa je bil bolj privlačen prvi, potem spet drugi, sredi šestdesetih let pa je na področju motorjev za vozila dokončno prevladal štiritaktni. Dvotaktni motor je ostal v rabi na področju majhnih motorjev, predvsem za motocikle, in na področju največjih dizelskih motorjev, predvsem za ladijski pogon.

Štiritaktni motor se je odlikoval predvsem v dveh značilnostih: prvič zaradi večje obratovalne zanesljivosti, predvsem pa daljše dobe trajanja, drugič pa zaradi večje gospodarnosti in boljših emisijskih lastnosti. Dvotaktni motor je bil odrinjen in raziskovalna in razvojna prizadevanja v zadnjih 20 letih so bila pretežno namenjena štiritaktnemu motorju, ki so ga močno izpopolnili, medtem ko se dvotaktni motor ni bistveno spremenil.

Obnoviti zanimanje za dvotaktni motor pomeni najprej odpraviti njegove pomanjkljivosti, izkoristiti pa njegove prednosti in dohiteti razvoj štiritaktnega

motorja, se pravi, bogate izsledke intenzivnih raziskovanj pri štiritaktnem motorju uporabiti za razvoj njegovega dvotaktnega tekmeča. Ugotovitev relativnih prednosti in pomanjkljivosti dvotaktnega motorja pred štiritaktnim na njeni današnji stopnji razvoja je izhodišče za nadaljnje iskanje. Preglednica v sklepnem poglavju tega članka v prvem ocenjevalnem stolpcu to stanje ponazarja (drugi stolpec prikazuje pričakovanja za predlagani dvotaktni motor).

Iz ocen po posameznih merilih in iz pripomb nanje lahko sklenemo, da pomanjkljivosti pri dvotaktnem motorju po svoji pomembnosti presega prednosti, zlasti pa so za dvotaktni motor usodne s splošnem slabše eksploatacijske lastnosti in pri ottovih motorjih tudi neugodna emisija in poraba goriva. Preusmeriti razvoj, da bo v prid dvotaktnega motorja z uveljavljanjem njegovih prednosti, ki so nedvomno vredne pozornosti, predvsem njegova specifična moč, pomeni odpraviti njegove pomanjkljivosti, ga izpopolniti s prednostmi sodobnega štiritaktnega motorja, da bo še boljši, predvsem glede spektra uporabnih goriv in glede emisije. Zasnovani motor, ki ga v nadaljevanju predstavljamo, obeta izpolnjenje teh prizadevanj.