



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**METODY KOREKCE VÝKONOVÝCH PARAMETRŮ
VZNĚTOVÉHO MOTORU**

METHODS OF CORRECTION PERFORMANCE PARAMETERS OF THE DIESEL ENGINE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Charouz

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Bc. Ondřej Charouz**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Automobilní a dopravní inženýrství
Vedoucí práce: **prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně zadává diplomovou práci s názvem:

Metody korekce výkonových parametrů vznětového motoru

Charakteristika problematiky úkolu:

Vytvoření metodiky přepočtu výkonových parametrů čtyřdobého vznětového motoru na atmosférické vlivy a vlastnosti paliva. Rozbor v současné době používaných korekcí výkonových parametrů motoru.

Cíle, kterých má být dosaženo:

Cílem je získat nejvhodnější způsob korekce vlivu teploty, vlhkosti a tlaku nasávaného vzduchu a jako druhý korekční faktor zahrnout vliv vlastností paliva (motorové nafty). Tyto korekční faktory budou přizpůsobeny konkrétnímu motoru pro vojenské nasazení. Metodika zpracování měření tohoto motoru na motorovém stanovišti.

Základní literární prameny:


ÇENGEL, Yunus A., BOLES, Michael A. Thermodynamics an engineering approach. 8. New York: McGraw-Hill, 2015, 1115 s. ISBN 978-0-07-339817-4.

FERGUSON, Colin R., KIRKPATRICK, Allan T. Internal combustion engines: applied thermosciences. Third. United Kingdom: John Wiley, 2016. ISBN 978-1-118-53331-4.

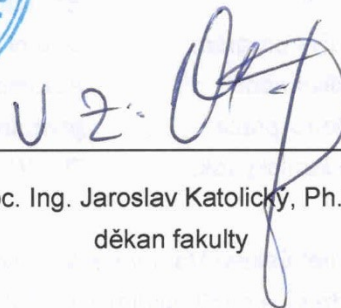
CATON, J. A. An introduction to thermodynamic cycle simulations for internal combustion engines. The Atrium, Southern Gates, Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley, 2016. ISBN 978-111-9037-569.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 21. 10. 2017



prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
ředitel



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá získáním nejvhodnějšího způsobu korekce vlivu teploty, vlhkosti a tlaku nasávaného vzduchu a také korekcí vlivu vlastností paliva (motorové nafty). Tyto korekční faktory jsou přizpůsobeny konkrétnímu motoru pro vojenské nasazení. Jedná o čtyřdobý, vznětový, přeplňovaný, šestiválcový spalovací motor PV6-K37 o objemu 19100 cm³. Tato práce se dále zabývá vytvořením metodiky zpracování měření tohoto motoru na motorovém stanovišti a pojednáním o současných způsobech korekce výkonu. Měření bylo prováděno v areálu firmy Excalibur Army spol. s r.o. ve Šternberku.

KLÍČOVÁ SLOVA

motor, měření, dynamometr, atmosférické podmínky

ABSTRACT

This diploma thesis deals with obtaining the most suitable way of correcting the influence of intake air pressure, temperature and humidity as well as correcting the influence of fuel properties (diesel fuel). These correction factors are adapted to a specific engine for military use. It is a four-stroke, diesel, turbocharged, 6-cylinder engine, PV6-K37, with a displacement of 19100 cm³. This work also deals with the creation of a methodology for the measurement of this motor at the engine station and with the treatise on current methods of power correction. The measurements were made in the premises of Excalibur Army Ltd. in Šternberk.

KEYWORDS

engine, measurement, dynamometer, atmospheric condition

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

CHAROUZ, O. *Metody korekce výkonových parametrů vznětového motoru*. Brno, 2018. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 90 s. Vedoucí diplomové práce Josef Štětina.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením prof. Ing. Josefa Štětiny, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25. května 2018

.....

Ondřej Charouz

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji svému vedoucímu práce prof. Ing. Josefovi Štětinovi, Ph.D. za jeho vstřícný a velmi ochotný přístup při tvorbě této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat společnosti Excalibur Army spol. s r.o., ve které jsem mohl tuto diplomovou práci vytvořit, zejména panu Ing. Milošovi Němcovi, vedoucímu konstrukce a také celému týmu pracovníků motorové zkušebny za jejich ochotu, rady a připomínky. Dík také patří mé rodině, která mi vytvořila dokonalé pracovní prostředí a zázemí nejen při tvorbě této práce, ale také během celého studia.

OBSAH

Úvod	9
1 Obrněný transportér OT-62 Topas	10
1.1 Všeobecný popis vozidla	10
1.2 Hnací ústrojí – motor	15
2 Spalovací motor – teorie.....	19
2.1 Tvorba směsi paliva	19
2.2 Výkon.....	20
2.3 Atmosférické vlivy na výkon.....	23
2.4 Vlivy vlastností paliva	26
3 Zkušební stanoviště	28
3.1 Postup připojení a spuštění zkoušeného motoru.....	30
3.2 Snímače.....	31
3.3 Kalibrace a přesnosti.....	34
4 Korekce.....	36
4.1 Naměřené hodnoty	38
4.2 Korekce na atmosférické podmínky	46
4.3 Korekce vlivů paliva	66
4.4 Současná korekce paliva i vzduchu	70
4.5 Výkon při jiných podmínkách měření	80
Závěr.....	82
Seznam použitých zkratk a symbolů	86
Seznam příloh.....	90

ÚVOD

Společnost Excalibur Army spol. s r.o. je součástí holdingové společnosti Czechoslovak Group, která zastřešuje aktivity skupiny průmyslových a obchodních společností z odvětví obranného i civilního průmyslu, sídlících převážně v České a Slovenské republice. Společnost Excalibur Army spol. s r.o. se zabývá zejména vývojem, modernizacemi a opravami vojenské techniky, například pásových i kolových vozidel nejrůznějších typů a určení, ale také samotných motorů. [14]

Jedním takovým motorem je i modernizovaný vznětový motor PV6-K37, který vychází z původní verze PV6. Tento motor je montován do obrněných transportérů OT-62 Topas Obr. 2, které v dnešní době využívá zejména Egyptská armáda díky jeho schopnosti se plavit po vodě. Díky rozdílným klimatickým podmínkám, které v dané zemi panují, je potřeba přednastavit výkon motoru tak, aby dosahoval požadovaných hodnot i se zohledněním atmosférických vlivů. Dalším parametrem, který ovlivňuje výkon motoru a je nutné jej zohlednit jsou vlastnosti použitého paliva (motorové nafty).

Parametry nasávaného vzduchu, které mají zásadní vliv na výkon motoru jsou teplota, tlak a vlhkost. Teplota a tlak vzduchu přímo souvisí s jeho hustotou. Ta s rostoucí teplotou (řidnutí vzduchu – nižší hmotnostní obsah kyslíku) a klesajícím tlakem klesá. Tlak vzduchu s rostoucí nadmořskou výškou klesá (opět řidší vzduch). Pro vyšší výkon je tedy potřeba vyšší tlak vzduchu (např. přeplňováním). Vysoká vlhkost vzduchu má negativní vliv na výkon zejména proto, že vodní páry zaujímají ve válci určitý objem. Dalo by se to přirovnat k nevypláchnutým spalinám z předchozího pracovního cyklu. Ty také zabírají určitý prostor pro naplnění spalovací komory směsí paliva se vzduchem.

Palivo je ovlivňováno zejména jeho teplotou, která má vliv na jeho hustotu. Při vyšší teplotě dochází k poklesu hustoty a tím i poklesu výkonu. Dalšími parametry, ovlivňující výkon motoru jsou jeho výhřevnost (energie uvolněná spalováním 1 kg paliva), viskozita, cetanové číslo (udává kvalitu nafty – schopnost samovznícení) a další.

Se zohledněním těchto vlivů je potřeba vytvořit metodiku korekce výkonu tak, aby se dalo předpovídat, jakého výkonu bude motor dosahovat při konkrétních jiných vlastnostech vzduchu a paliva. Na základě toho pak bude možné změnit dávku paliva do spalovacího prostoru motoru tak, aby došlo k požadovanému zvýšení výkonu. Měření je prováděno na motorovém zkušebním stanovišti v areálu firmy Excalibur Army spol. s r.o. ve Šternberku pomocí měření na vířivém dynamometru.

Korekcí výkonu se zabývá několik národních i mezinárodních organizací, které vytvářejí normy jako jsou: ISO, SAE, ECE, DIN, ČSN a další. Vytvořené korekce budou v této práci porovnávány s některými z nich.



Obr. 1 Logo firmy Excalibur Army spol. s r.o. [14]

1 OBRNĚNÝ TRANSPORTÉR OT-62 TOPAS

1.1 VŠEOBECNÝ POPIS VOZIDLA

Střední pásový obojživelný obrněný transportér OT-62 je bojové vozidlo motostřeleckých jednotek přizpůsobené k boji na souši i na vodě. Kromě vlastního určení může sloužit i k přepravě různých nákladů a různého materiálu na bojišti. [4]



Obr. 2 Obrněný transportér OT-62 Topas – Egypt [16]

Jako obojživelné bojové vozidlo umožňuje přepravu dvaceti členné osádky (včetně řidiče).

Podvozek vozidla může být také využit pro různé speciální nástavby (velitelské, spojovací, ženijní, zdravotnické apod.).

Na vodních překážkách může přepravovat náklad o váze až 2000 kg, tj. zatížení, při kterém hladina vody dosahuje k horní hraně zadního svislého pancíře. Přepravovaný náklad se ukládá v bojovém prostoru a na korbě vozidla rovnoměrně tak, aby nebyla narušena stabilita vozidla na vodě. K upevnění nákladu slouží přichytky, přivařené ke korbě, lana a řemenové popruhy.

Hlavní části vozidla jsou: korba, výzbroj, hnací ústrojí, převodové ústrojí, ústrojí k pohonu na vodě, podvozek, elektrická výzbroj, pojítka, filtrační a ventilační zařízení a požární zařízení. [4]

Vnitřní část vozidla je rozdělena na tři hlavní prostory:

- řidičský prostor,
- bojový prostor,
- motorový a převodový prostor.

1.1.1 ŘIDIČSKÝ PROSTOR

Řidičský prostor je v přední části korby. Je v něm umístěna: sedačka řidiče, ovládací páky a pedály řízení, kulisa řazení převodových stupňů, přístrojová deska, kontrolní a měřicí přístroje, ovládací páky napínacího ústrojí, ruční palivové čerpadlo, od vzdušňovací kohout palivového ústrojí (u vozidel novějších sérií je ruční palivové čerpadlo a od vzdušňovací kohout, umístěn za motorovou přepážkou), láhev se stlačeným vzduchem, tlakoměr a kohout, ústrojí pro spouštění motoru vzduchem, láhve a ovládací ústrojí požárního zařízení, gyropolokompas s měničem, zdroj vysokého napětí infrahledu, akumulátory, hlavní vypínač, osvětlovací svítilny, zásuvka přenosné svítilny, pojistková skříňka se svorkami vnějšího nabíjení, skříňka A-2 vnitřního hovorového zařízení a pozorovací přístroje řidiče. Nad sedačkou řidiče je v předním šikmém pancíři otvor s příklopem řidiče. [4]



Obr. 3 – Kabina vozidla OT 62 – vyřazené vozidlo

V řidičském prostoru je také umístěna část výstroje, zásob střeliva a schránka se zaměřovacím infradalekohledem a příslušenstvím zbraní.

Vlevo od místa pro řidiče je sedačka velitele. Na místě pro velitele jsou instalovány: hodinky, rádiová stanice a skříňka A-1 vnitřního hovorového zařízení, ovládací ústrojí otočného světloometu a kloubu antény. Ve velitelské věžičce jsou pozorovací přístroje velitele.

Vpravo od místa pro řidiče je sedačka střelce. Na místě pro střelce jsou ve věžičce pozorovací přístroje střelce a skříňka A-3 vnitřního hovorového zařízení. Nad sedačkou střelce jsou v otočné věžičce umístěny zbraně, zaměřovač a zařízení k jejich ovládní. [4]

1.1.2 BOJOVÝ PROSTOR

Bojový prostor je ve střední části vozidla. Po obou stranách jsou boční nouzové dveře s příklopy. K pozorování a střelbě do boků a dozadu slouží střílny. V bojovém prostoru jsou umístěny čtyři řady sedaček (celkem pro 17 mužů) ve směru podélné osy vozidla. Ve stropu bojového prostoru jsou hlavní otvory s příklopy pro nasedání a vylázení výsadku. Pod sedačkami na podlaze jsou tři schránky pro uložení střeliva do tarasnice a RPG-7. V zadní části podlahy jsou dvojice dvířka pro přístup k vypouštěcím ventilům chladicího ústrojí motoru.

Na pravé straně bojového prostoru je umístěna lékárnička, regulační relé dynamy a držák pro rádiovou stanici přepravované jednotky.

Na levé straně je umístěno filtrační a ventilační zařízení, schránka s infrahledem, zásuvka pro vnější spouštění motoru, ruční hasicí přístroj, panel pro ovládání ohřívače a prepínací kohout palivového ústrojí.

Na stropu bojového prostoru jsou držadla, dále držáky pro RPG-7 a antény.

Bojový prostor je oddělen od motorového prostoru motorovou přepážkou. Na zadní stěně bojového prostoru a na motorové přepážce jsou držáky pro uchycení 2 kulometů, 1 RPG-7, páky pro ovládání žaluzií a ústrojí pro ochranu výfuku, vstupní a výstupní otvory vzduchu pro vytápění vnitřního prostoru vozidla teplým vzduchem (dále jen topení), vypínače topení a osvětlení motorového prostoru, kryt spojky k ručnímu protáčení klikového hřídele a osvětlení bojového prostoru.

Po stranách bojového prostoru, pod sedačkami a ve schránkách na dně je uložena výstroj vozidla a přepravované jednotky. [4]

1.1.3 MOTOROVÝ A PŘEVODOVÝ PROSTOR

Motorový a převodový prostor je v zadní části vozidla. Je v něm umístěn motor s příslušenstvím převodové ústrojí, ústrojí pro pohon vozidla na vodě, ohřívač a topení.

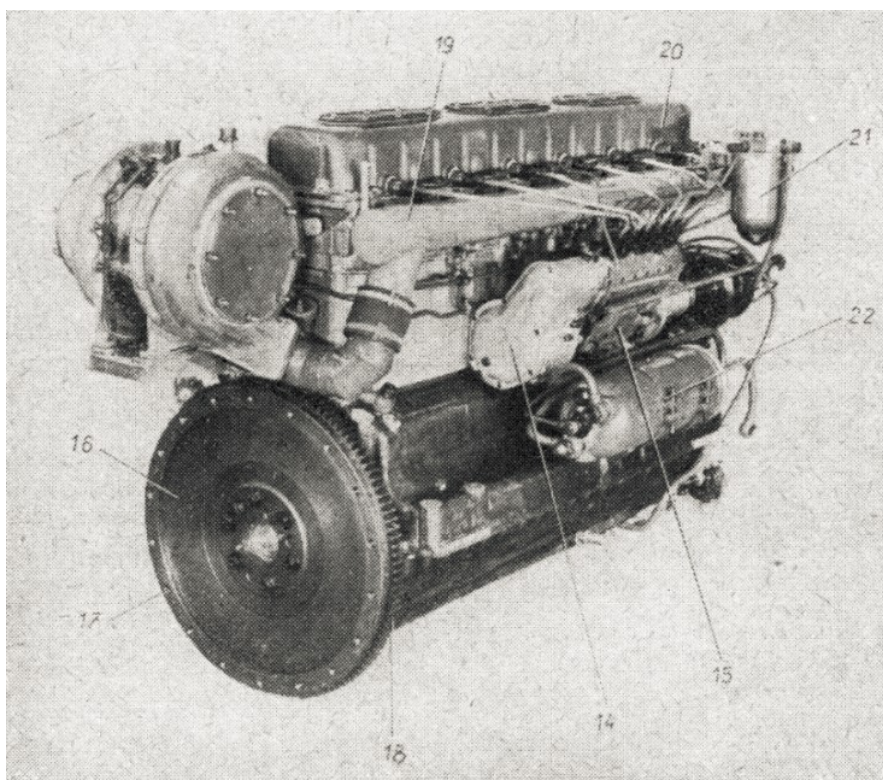
Na dně korby jsou vedena ovládací táhla a pod nimi jsou uloženy torzní tyče.

V bojovém prostoru jsou táhla pokryta snímatelnou podlahou. Pod podlahou je umístěna schránka pro nedotknutelnou dávku potravin.

Vně vozidla jsou umístěny tři světlomety, obrysová světla, anténa rádiové stanice, vlnolam, vlečné háky, tažný hák k připojení přívěsu (kanónu), vlečná lana a držáky pro upevnění výstroje. Na zádi vozidla nad motorovým a převodovým prostorem se ukládá zbývající část výstroje vozidla. Současně je tam možno uložit nakládací zařízení (nájezdové můstky). [4]

Motor PV6– původní verze

Druh	čtyřdobý naftový motor s přímým vstřikem paliva s kapalinovým chlazením a přepřňovaný turbodmychadlem
Značka	PV-6
Počet válců	6
Uspořádání válců	vertikální, řadové
Průměr pístu	150 mm
Zdvih pístu	180 mm
Obsah válců	19100 cm ³
Kompresní poměr	14 až 15
Otáčení klikového hřídele	ve směru otáčení hodinových ručiček (při pohledu ze strany rozvodu)
Maximální výkon (při 1800 min ⁻¹)	220 kW
Provozní otáčky	1600 až 1800 min ⁻¹
Minimální otáčky volnoběhu	500 min ⁻¹
Maximální krouticí moment (při 1100 až 1200 min ⁻¹)	1270 ±50 Nm
Pořadí práce válců	1-5-3-6-2-4
Váha suchého motoru se spouštěčem, setrvačником a turbodmychadlem	895 kg
Specifická spotřeba paliva	177 g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹



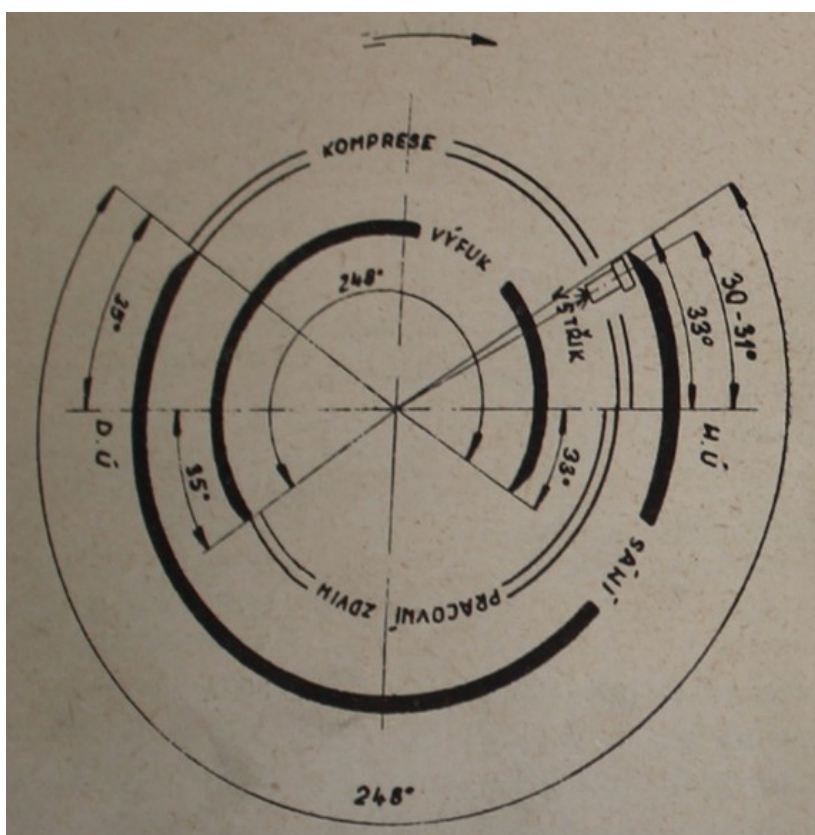
Obr. 4 Původní verze motoru PV6

Motor PV6-K37 – modernizovaná verze

Maximální výkon:	260 kW při 1800 min ⁻¹
Maximální točivý moment:	1550-1650 Nm při 1300 min ⁻¹
Maximální otáčky motoru:	2300 min ⁻¹
Minimální otáčky motoru:	800 min ⁻¹
Maximální spotřeba paliva:	238 g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹ při 1800 min ⁻¹
Maximální spotřeba oleje:	13,1 g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹ při 1600 min ⁻¹
Tlak oleje v hlavním potrubí:	0,7 – 1 MPa při provozních otáčkách

Časování ventilů:

Sací ventily se otevírají	33° ±3° před HÚ
Sací ventily se zavírají	35° ±3° za DÚ
Výfukové ventily se otevírají	35° ±3° před DÚ
Výfukové ventily se zavírají	33° ±3° za HÚ
Překrytí ventilů	66°
Vůle mezi talířkem ventilu (sacího a výfukového) a vačkou	2,34 ±0,1 mm



Obr. 5 - Časování ventilů motoru PV6

1.2 HNACÍ ÚSTROJÍ – MOTOR

Hnací ústrojí se skládá z motoru a jeho příslušenství: palivového ústrojí, mazacího ústrojí, chladicího ústrojí, ohřívacího ústrojí, ústrojí pro spouštění motoru a ústrojí pro ochranu výfuku proti vniknutí vody.

Motor se skládá z pevných a pohyblivých částí. Pevné části motoru jsou kliková skříň, blok válců (plášť, vložky a hlava). Pohyblivé části jsou klikové ústrojí, rozvodové a převodové ústrojí. [4]

1.2.1 KLIKOVÁ SKŘÍŇ

Skládá se z horní a dolní části. Dělicí rovina klikové skříně prochází osou klikového hřídele. Obě části jsou odlitky ze slitiny hliníku.

V horní části klikové skříně je sedm příčných žeber, na kterých jsou uložena ložiska klikového hřídele. Horní horizontální rovina horní části skříně slouží k ustavení bloků válců. Ne bocích horní části skříně jsou také umístěny držáky k uchycení čističe oleje, dynamo, spouštěče a šikmá rovina se dvěma držáky k uchycení vstřikovacího čerpadla. Na dně dolní části klikové skříně jsou dvě sběrné nádržky, ze kterých se olej odsává olejovým čerpadlem. Na pravém boku je čerpadlo chladicí kapaliny. Olejové čerpadlo je umístěno pod úrovní dělicí roviny. Na levé straně dolní části skříně je palivové čerpadlo a náhon otáčkoměru. [4]

1.2.2 BLOK VÁLCŮ

Skládá se z pláště, který je odlit ze slitiny hliníku, ze šesti ocelových vložek a hlavy bloku. Číslování válců motoru (1 – 6) začíná ze strany rozvodového ústrojí. Mezi pláštěm válců a vložkami v dolní části jsou těsnicí kroužky, které zabraňují protékání chladicí kapaliny do klikové skříně motoru. Styková plocha mezi hlavami bloku a vložkami válců se utěsňuje těsněním ze slitiny lehkých kovů, které zabraňuje unikání plynů z válců. [4]



Obr. 6 - Motor PV6-K37 – strana výfuku

1.2.3 KLIKOVÉ ÚSTROJÍ

Slouží k přeměně přímočarého vratného pohybu pístů na otáčivý pohyb klikového hřídele. Skládá se z klikového hřídele, ojnice a pístních soustav.

Klikový hřídel má 6 ojnicích, 7 hlavních čepů a 12 protizávaží, která jsou nalisována na ramenech. Ojniční čepy jsou ve třech rovinách pootočených vůči sobě o 120°. Klikový hřídel je uložen v hlavních ložiskách s ocelovými pouzdry vylitými olovnatým bronzem a po opracování jsou poolovněny. Na drážkách předního konce klikového hřídele je nasazeno kuželové kolo pohonu rozvodového ústrojí. Na konec hřídele je nalisována příruba, na kterou se nasazuje a upevňuje pomocí šroubů setrvačnick s ozubeným věncem pro záběr se spouštěčem motoru. Na obvodu věnce jsou otvory se závitem pro uchycení třecí spojky.

Ojnice se skládá z dříku tvaru H, z oka a hlavy ojnice. Hlava ojnice je uchycena na ojnicím čepu a má snímatelné víko. Do otvoru hlavy se montuje rozebíratelné ocelové pouzdro vylité olovnatým bronzem. Do otvoru oka ojnice je zalisováno bronzové pouzdro jako ložisko pro pístní čep.

Pístní sestava se skládá z vlastního pístu, z pístních kroužků a pístního čepu se záslepkami. Píst je odlit z hliníkové slitiny. Speciální tvar dna pístu přispívá k lepšímu promísení paliva

se vzduchem a nejefektivnějšímu shoření směsi. Na povrchu pístu je 5 drážek pro pístní kroužky, z kterých jsou 4 nad pístním čepem a 1 pod ním. Dva horní kroužky jsou těsnicí a ostatní stírací.



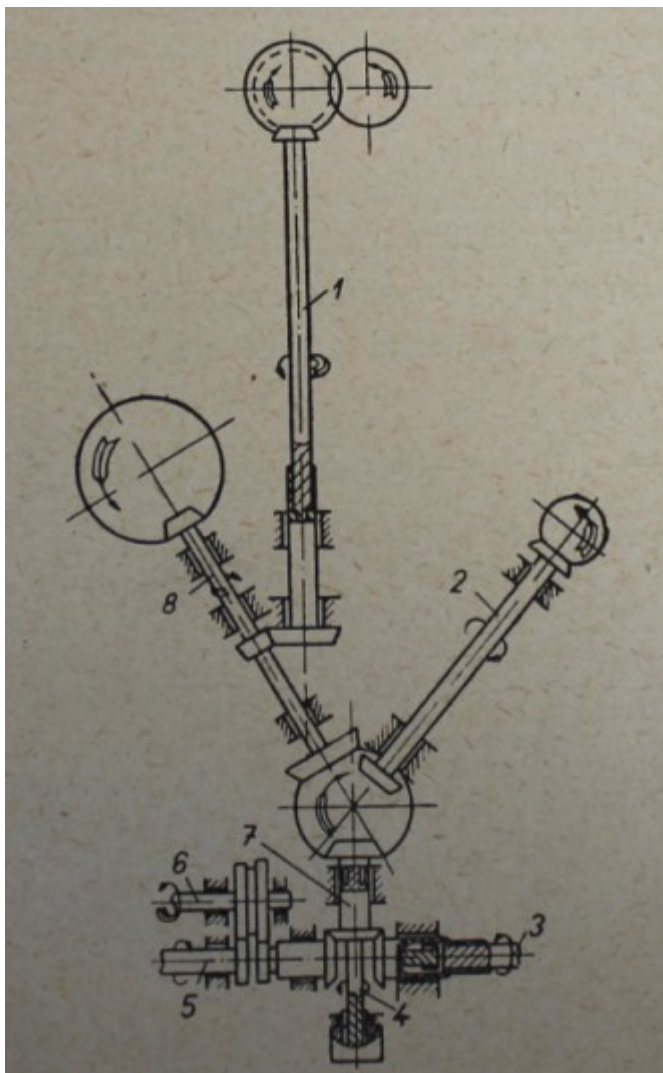
Obr. 7 - Motor PV6-K37 – strana sání

Pístní čep je ocelový, dutý a plovoucí. Osově posunutí pístního čepu je ohraničeno dvěma záslepkami pístního čepu, jednou z každé strany. [4]

1.2.4 ROZVODOVÉ A PŘEVODOVÉ ÚSTROJÍ

Tato ústrojí přenáší pohyb od klikového hřídele motoru na ústrojí, zajišťující práci motoru a otevírání a zavírání v příslušném okamžiku sacích a výfukových otvorů v hlavách válců.

Váčkové hřídele jsou uchyceny na hlavě bloku válců v sedmi ložiskách. Jedná se o hřídel sacích ventilů, která se otáčí ve směru pohybu hodinových ručiček (při pohledu ze strany rozvodu) a o hřídel výfukových ventilů, která se otáčí proti směru pohybu hodinových ručiček.



Obr. 8 - Schéma rozvodového a převodového ústrojí motoru [4]

Ventilové ústrojí se skládá ze sacích a výfukových ventilů, ventilových pružin, talířů ventilů a z pojistek talířů ventilů. Pro každý válec jsou čtyři ventily, dva sací a dva výfukové. Sací ventily mají ploché hlavy, výfukové mají vypouklé. Průměr hlavy sacího ventilu je o něco větší, než průměr hlavy ventilu výfukového. [4]

1.2.5 ULOŽENÍ MOTORU VE VOZIDLE

Motor je uložen v ose vozidla na loži motoru, které je přivařeno ke dnu korby. Pro zabezpečení souososti osy motoru a převodovky je nutno motor s převodovkou soustředit. Soustředění motoru s převodovkou se provádí pomocí přípravku na hnacím bubnu hlavní spojky a objímce zubové spojky převodovky. [4]

2 SPALOVACÍ MOTOR – TEORIE

Spalovacím motorem se rozumí stroj, který transformuje chemickou energii paliva (prostřednictvím její primární přeměny na energii tepelnou při spalování) na energii mechanickou. Přeměna chemické energie probíhá spalováním, tepelná energie se poté změní na mechanickou práci přenesením této energie na pracovní médium, které při zvýšeném tlaku expanduje a vykonává tak práci. Pracovní médium může být buď plynné nebo kapalné. Kapalné expanduje pomocí jeho vypařování, kapalné pomocí jeho stlačitelnosti. [5]

2.1 TVORBA SMĚSI PALIVA

Jelikož se směs skládá z poměru hmotnosti paliva spalovacího vzduchu, je potřeba pro určitý objem paliva přivést odpovídající množství kyslíku. Toto množství kyslíku, se dá teoreticky určit jako L_O . Vztah pracuje s poměrnými množstvími jednotlivých složek prvků. Jsou to v kg: množství uhlíku, vodíku, síry a kyslíku. Vztah je vyjádřen v rovnici (1). [3]

$$L_O = \frac{8}{3} \cdot m_C + 8 \cdot m_H + m_S - m_O \quad (1)$$

kde:

L_O	[kg]	- teoretické množství vzduchu
m_C	[kg]	- množství uhlíku
m_H	[kg]	- množství vodíku
m_S	[kg]	- množství síry
m_O	[kg]	- množství kyslíku

Pokud bychom chtěli teoretické množství vzduchu určit pro 1 kg paliva, můžeme vyjít ze znalosti, že ve vzduchu je 23 % hmotnosti vzduchu. Pak lze použít vztah (2):

$$L_t = \frac{1}{0,23} \cdot L_O \quad (2)$$

Typické hodnoty L_t se pro benzín pohybují někde kolem 14,7 – 15 kg vzduchu na 1 kg paliva a pro naftu zhruba 14,3 – 14,5 kg vzduchu na 1 kg paliva. Záleží však na chemickém složení paliva, které se může mírně lišit. Tento poměr mezi množstvím vzduchu a paliva se považuje za ideální a označuje se jako stechiometrický poměr nebo stechiometrická směs. [3]

2.2 VÝKON

Výkon každého motoru závisí zejména na těchto dvou parametrech:

1. na teple dodaném palivem do pracovního válce,
2. na účinnosti přeměny tepla v mechanickou práci.

Tuto skutečnost lze popsat vztahem (3):

$$P_e = Q_p \cdot \eta_e = H_u \cdot \dot{m}_p \cdot \eta_e \quad (3)$$

kde:

P_e	[kW]	- efektivní výkon motoru
Q_p	[J]	- teplo dodané palivem do pracovního válce
η_e	[-]	- efektivní účinnost
H_u	[kJ·kg ⁻¹]	- spodní výhřevnost paliva
\dot{m}_p	[kg·s ⁻¹]	- hmotnostní množství paliva

Abychom byli schopni spálit odpovídající hmotnost paliva je zapotřebí mít k dispozici také úměrnou hmotnost vzduchu v pracovním válci. Vztah obou těchto hmotnostní udává výraz (4):

$$\dot{m}_p = \frac{\dot{m}_s}{\lambda \cdot L_t} \quad (4)$$

kde:

\dot{m}_s	[kg·s ⁻¹]	- hmotnostní množství vzduchu, které zůstává ve válci motoru
λ	[-]	- součinitel přebytku vzduchu
L_t	[kg _{vz} ·kg _{pal} ⁻¹]	- teoreticky potřebné množství vzduchu pro spálení 1 kg paliva

Pokud vyjádříme hmotnost vzduchu, která zůstane ve válci pro spalování, parametry motoru dostaneme vztah pro hmotnostní průtok (5):

$$\dot{m}_s = V_z \cdot \frac{n}{60 \cdot i} \cdot \rho_s \cdot \eta_{pl} \cdot \frac{\varepsilon + (\alpha - 1)}{\varepsilon - 1} \quad (5)$$

kde:

V_z	[m ³]	- zdvihový objem
n	[min ⁻¹]	- otáčky motoru
i	[-]	- počet otáček motoru na jeden pracovní cyklus (pro 4T i=2)
ρ_s	[kg·m ⁻³]	- hustota vzduchu
η_{pl}	[-]	- plnicí účinnost
ε	[-]	- kompresní poměr
α	[-]	- stupeň vypláchnutí spalovacího prostoru

Dosažením rovnic (4) a (5) dostaneme výslednou rovnici (6) ve tvaru:

$$P_e = V_z \cdot \frac{n}{60 \cdot i} \cdot \frac{H_u}{\lambda \cdot L_t} \cdot \rho_s \cdot \eta_{pl} \cdot \eta_e \cdot \frac{\varepsilon + (\alpha - 1)}{\varepsilon - 1} \quad (6)$$

Nyní jsou zřejmé veličiny, které mají přímý vliv na výkon motoru. Pokud uvažujeme u stejného motoru stejné otáčky, hlavním parametrem, který má vliv na výkon motoru je hustota vzduchu, plnicí a užitečná účinnost a součinitel přebytku vzduchu. Zvýšení hustoty vzduchu je možné vyjádřit pomocí stavové rovnice (7).

$$\rho_s = \frac{p_s}{r_s \cdot T_s} \quad (7)$$

kde:

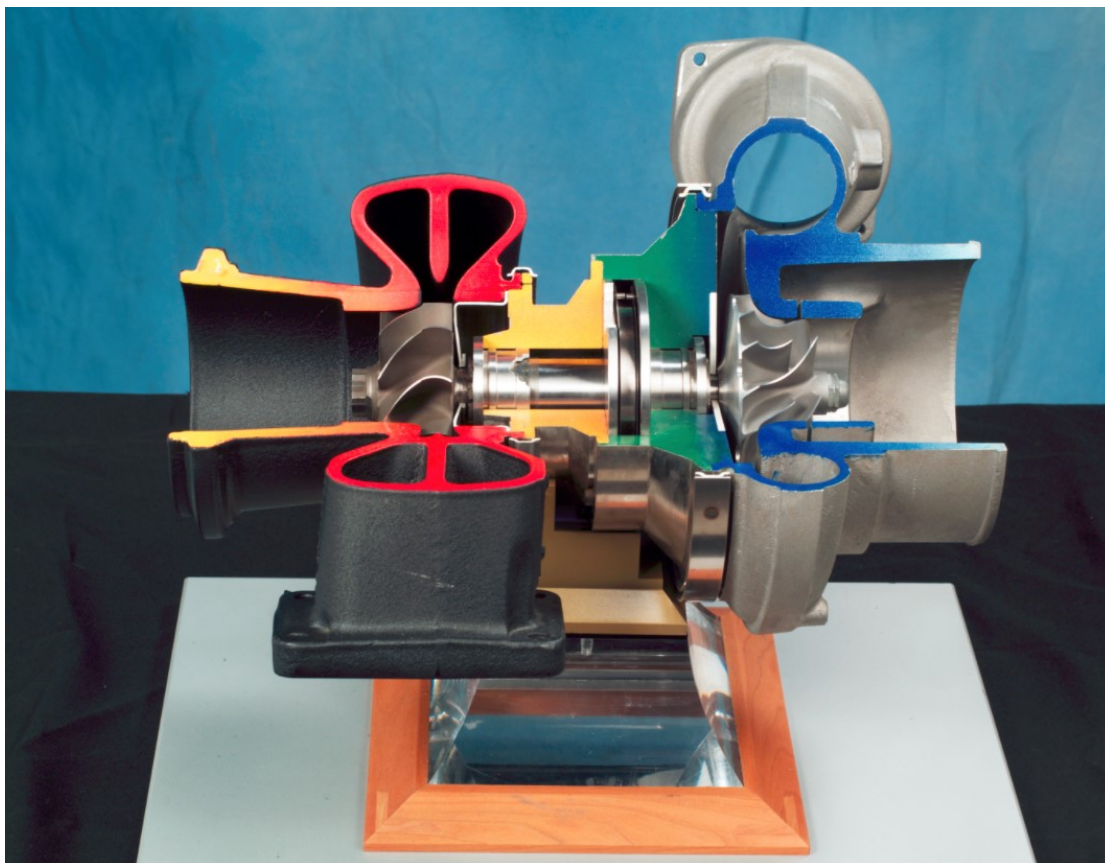
p_s	[Pa]	- tlak vzduchu v sání motoru
r_s	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	- měrná plynová konstanta
T_s	[K]	- teplota vzduchu v sání motoru

Jak je patrné z rovnice (7), ke zvýšení výkonu motoru může dojít mimo jiné, buď zvýšením sacího tlaku (přeplňování) nebo snížením teploty vzduchu v sání. 84

2.2.1 PŘEPLŇOVÁNÍ

Přeplňování spalovacích, zejména naftových motorů, je známé již od počátku 20. století. K jeho výraznému rozšíření došlo ale až po druhé světové válce, díky zdokonalení konstrukce turbodmychadel (rotační lopatkový stroj). Díky přeplňování dochází k výraznému zvýšení výkonu motoru při zachování nebo dokonce snížení měrné spotřeby paliva. Na druhou stranu se tento zásah neobejde bez určitého nárůstu zastavovacích rozměrů a hmotnosti motoru.

Přeplňování je možno dosáhnout dvěma způsoby a to: pomocí pulsací (tlakových vln) v sacím systému motoru s přirozeným nasáváním a jejich dynamického účinku k většímu naplnění válce. Není to však vhodné řešení pro všechny otáčky motoru, pokud není možné regulovat délku a provedení plnicího potrubí. Druhá možnost, která se používá daleko více, je použití různých typů kompresorů. Jsou to například kompresory poháněné mechanicky od motoru (axiální, radiální odstředivé, rotační objemové nebo pístové) nebo poháněné turbínou na výfukové plyny (turbodmychadla), která není spojena s motorem přímo, ale pouze plynovou vazbou (plnicí vzduch – výfukové plyny). [6]



Obr. 9 - Řez turbodmychadlem [19]

2.2.2 SOUČINTEL PŘEBYTKU VZDUCHU

Hodnota součinitele přebytku vzduchu nepřímo úměrně ovlivňuje výkon motoru. Je proto velice důležité zvolit vhodnou hodnotu. Jedná se o poměr množství vzduchu skutečně obsaženém ve směsi vůči teoretickému množství vzduchu, potřebné pro dokonalé spálení paliva.

Pro veličinu λ mohou nastat tři stavy. Pokud je $\lambda > 1$, jedná se o směs chudou. Znamená to, že směs pracuje s přebytkem vzduchu. Naopak pokud je $\lambda < 1$, jedná se o směs bohatou. Pokud je $\lambda = 1$, jde o směs ideální, tzv. stechiometrickou. Vznětové motory pracují s přebytkem vzduchu. Hodnota λ se pohybuje zhruba mezi 1,15 – 1,65 u nepřepřehovaných motorů. U přeplňovaných motorů se hodnota λ pohybuje o něco výše a to zhruba 1,7 – 2,2. Pracuje tedy s velkým přebytkem vzduchu. Je to zejména z důvodu požadavku na dobré prohoření směsi. Po vstříknutí dávky paliva do stlačeného vzduchu se kapičky paliva začnou vypařovat a v určitém okamžiku se v okolí každé z nich vytvoří podmínky pro vznícení. Zážehové motory pracují s menší hodnotou λ a to zhruba od 0,85 – 1,1. Pro směs benzínu a vzduchu je horní hranice zápalnosti 1,3 a dolní hranice 0,5. [6]

2.2.3 PLNICÍ ÚČINNOST

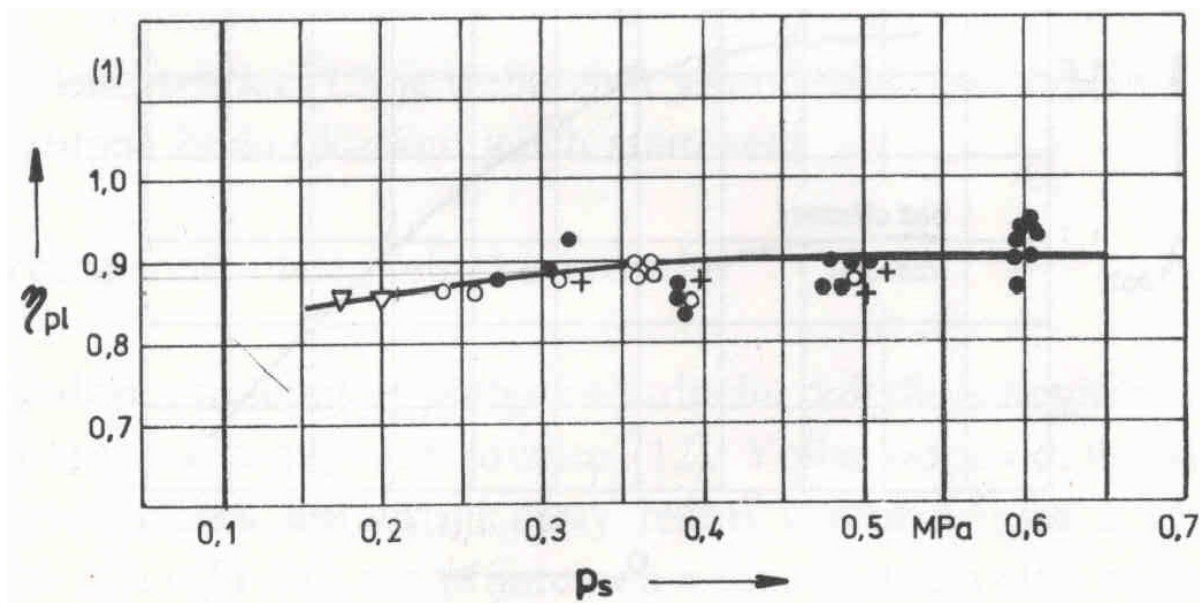
Hlavním parametrem, který udává kvalitu naplnění válce, je plnicí účinnost motoru. Je dána vztahem:

$$\eta_{pl} = \frac{m_s}{m_t} \quad (8)$$

kde:

m_s	[kg]	- skutečná hmotnost vzduchu ve válci motoru
m_t	[kg]	- teoreticky možná hmotnost vzduchu ve válci motoru

Tyto obě hmotnosti jsou vztaženy na stav vzduchu před sacími ventily. Zjištění hodnoty plnicí účinnosti u přeplňovaných motorů je velmi obtížné. Způsob měření je komplikovaný a zdouhavý, v běžných případech není ani možný. Je to způsobeno zejména tím, že při propláchnutím spalovacího prostoru část vzduchu uniká válcem do výfukového potrubí. U motorů bez proplachování se měřením zjišťuje přesněji. Velmi často se plnicí účinnost vyjadřuje jako funkce plnicího tlaku. Tato závislost je často zobrazována graficky různými autory, přičemž se údaje liší jen velmi málo. S rostoucím plnicím tlakem se plnicí účinnost poněkud zvyšuje, viz Obr. 10, na kterém jsou vidět experimentálně naměřené hodnoty ze čtyř zkoušených motorů. Při nejvíce používaném plnicím tlaku (do 0,4 MPa) je možné sledovat pro přeplňované větší čtyřdobé spalovací motory, že se hodnota plnicí účinnosti se drží v rozmezí 0,85 až 0,9. Pro motory menší bude hodnota na dolní hranici uvedeného rozmezí. [6]



Obr. 10 Plnicí účinnost přeplňovaného čtyřdobého spalovacího motoru v závislosti na plnicím tlaku. Experimentální hodnoty ze čtyř zkoušených motorů. [6]

2.3 ATMOSFÉRICKÉ VLIVY NA VÝKON

Jak již bylo naznačeno v kapitole 2, velký vliv na výkon motoru mají zejména atmosférické vlivy. Patří zde teplota, tlak a vlhkost vzduchu. Každý z těchto parametrů bude blíže popsán v následujících kapitolách.

2.3.1 VLIV TEPLoty NASÁVANÉHO VZDUCHU

Jedním z hlavních parametrů, ovlivňujících výkon motoru je teplota nasávaného vzduchu. Je to způsobeno tím, že teplota vzduchu přímo souvisí s hustotou vzduchu, která ovlivňuje plnicí účinnost motoru. Dalo by se říct, že nižší teplota nasávaného vzduchu znamená zvýšení výkonu motoru. Vyšší hustota vzduchu, vstupujícího do motoru znamená, že se do motoru dostane více vzduchu a tím se i zvýší dávka paliva. Tyto dva parametry ovlivňují množství tepla, které je pak dodané do pracovního oběhu, čímž dojde k nárůstu výkonu. Tak to ale platí jen do určité teploty, protože při příliš vysoké hustotě dochází ke špatnému a nerovnoměrnému mísení směsi, což může způsobit vynechávání motoru nebo zvýšení produkce emisí. Naproti tomu příliš vysoká teplota způsobuje snížení hustoty spalovacího vzduchu, čímž se sníží plnicí účinnost a tím pádem i výkon motoru. Změna hustoty se také projeví v množství kyslíku, které jsme schopni dostat do spalovacího prostoru. Teplota spalovacího vzduchu by se měla tedy držet někde mezi těmito dvěma extrémy. Při přepřňování dochází k velkému nárůstu teploty nasávaného vzduchu. Proto se zejména u motorů s vysokým stupněm přepřňení používá mezichladič (intercooler), který vzduch ochlazuje. [7]

2.3.2 VLIV TLAKU NASÁVANÉHO VZDUCHU

Hlavní vliv tlaku na výkon motoru byl popsán v kapitole 2.2. Zvýšením tlaku je možné zvýšit množství spalovací směsi, kterou je možné přivést do spalovacího prostoru. Tím dojde k navýšení výkonu. Z tohoto důvodu se používá přepřňování motorů (viz kapitola 2.2.2). S narůstající nadmořskou výškou dochází k poklesu tlaku. Budeme-li se pohybovat ve výšce 5500 m. n. n, bude na nás působit tlak poloviční oproti tlaku, který by na nás působil u například u moře, kde počítáme nadmořskou výšku 0 m. n. m. Závislost tlaku na nadmořské výšce je znázorněna v Tab. 1.

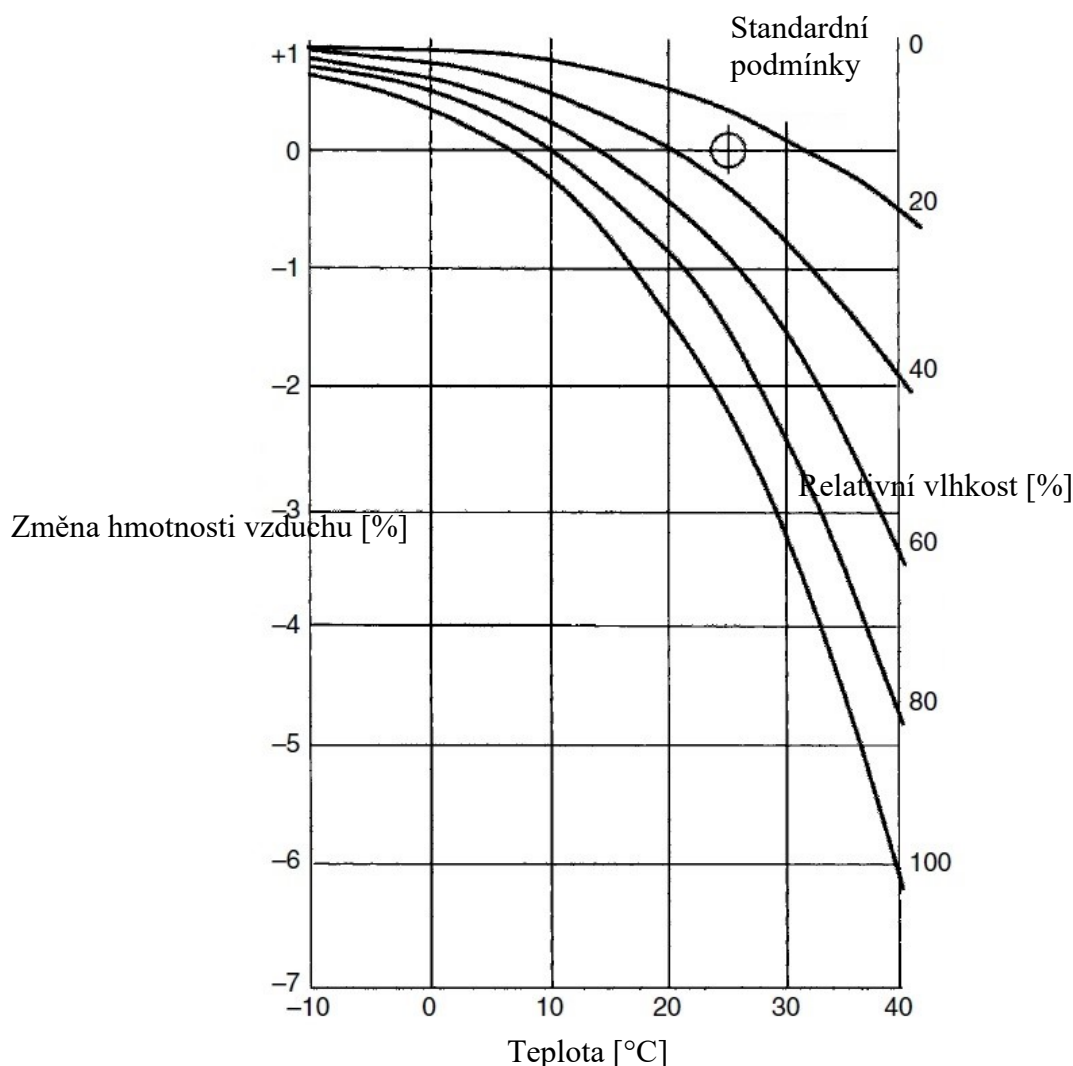
Tab. 1 Závislost tlaku na nadmořské výšce [15]

Tlak	Nadmořská výška
[kPa]	[m]
101,325	0
100	111
95	540
90	989
85	1457
80	1949
75	2466
70	3012
65	3591
60	4206
55	4865
50	5574
45	6344
40	7185
35	8117
30	9164
25	10363
20	11775
15	13509
10	15797
5	19323

2.3.3 VLIV VLHKOSTI NASÁVANÉHO VZDUCHU

Vlhkost vzduchu má také vliv na výkon motoru. Její účinek se při vyšších teplotách projevuje výrazněji, než při teplotách nižších. Vyšší vlhkost vzduchu snižuje výkon motoru. Je to způsobeno tím, že vodní páry zaujímají ve válci určitý objem. Dalo by se to přirovnat k nevypláchnutým spalinám z předchozího pracovního cyklu. Ty také zabírají určitý prostor pro naplnění spalovací komory směsí paliva se vzduchem. Menší množství vzduchu pak má za následek menší množství molekul kyslíku a tedy i snížení výkonu. Relativní vlhkost vzduchu udává míru nasycení vodních par. Relativní vlhkost vzduchu udává poměr mezi okamžitým množstvím vodních par ve vzduchu a množstvím par, které by měl vzduch o stejném tlaku a teplotě při plném nasycení. Udává se v procentech (%). Normovaná hodnota relativní vlhkosti vzduchu pro měření parametrů spalovacích motorů je 30 % při teplotě 25 °C.

Výhodou přítomnosti určitého procenta vody ve spalovacím prostoru je chladičí účinek a také snížení množství produktů nedokonalého spalování. Naopak nevýhodou, jak již bylo zmíněno výše, je snížení podílu kyslíku na jednotku objemu vzduchu. Mimo jiné může docházet také k tvorbě koroze ve spalovacím prostoru, v sacím a výfukovém potrubí. Nepříznivý vliv má vyšší vlhkost vzduchu mimo jiné také na funkci různých senzorů v automobilu. [7]



Obr. 11 Změna hmotnosti vzduchu v závislosti na relativní vlhkosti a teplotě vzduchu [2]

2.4 VLIVY VLASTNOSTÍ PALIVA

2.4.1 CETANOVÉ ČÍSLO

Cetanové číslo určuje reaktivitu nafty neboli schopnost nafty ke vznícování. Projevuje se zejména prodlevou mezi vstřikem paliva do válce a nárůstem tlaku ve válci po vznícení směsi na maximální hodnotu. **Nízké cetanové číslo** – má negativní vliv na emise. Nejvíce negativní vliv má při studeném startu, kdy není motor dostatečně zahřátý na to, aby prohořela celá dávka paliva. V důsledku toho dochází ke zvýšení obsahu CO, zvýšení nespálených a částečně zoxidovaných uhlovodíků a také k tzv. bílému kouři. Kromě toho se nízké cetanové číslo projevuje tvrdým chodem motoru a jím způsobeným hlukem. **Vysoké cetanové číslo** – zkracuje délku okamžiku zpoždění zážehu. Čím vyšší je cetanové číslo, tím je spalování dokonalejší a pravidelnější. Stejně tak se zlepšuje i chod motoru. [8]

Stanovení cetanového čísla

Způsoby stanovení cetanového čísla předepisují technické normy ČSN EN ISO 5165(1998) a ASTM D 613. Měření se uskutečňuje na speciálních měřicích vznětových motorech, u kterých se porovnává konkrétní vzorek paliva s referenčním vzorkem a sleduje se, zda průběh vznětu je v obou případech při změnách kompresního poměru stejný.

Ke stanovení velikosti cetanového čísla se používá stejný jednoválcový motor, jako pro stanovení velikosti oktanového čísla. Tak jako v případě určování oktanového čísla, je i cetanové číslo určeno objemovým podílem dvou látek. Cetanu (n-hexadekanu – cetanové číslo 100 charakterizující velmi krátkou prodlevu vznícení) a 1-methylnaftalenu (cetanové číslo 0 charakterizující velmi dlouhou prodlevu vznícení).

$$C\check{c} = \frac{C_{16}H_{34}}{C_{11}H_{11}}$$

Minimální hranice $C\check{c}$ pro studený start je 40 jednotek. Pro zajištění snadného studeného startu je potřeba hodnota $C\check{c}$ nad 50 jednotek. Výkon motoru cetanovým číslem není přímo ovlivněn, palivo s menším cetanovým číslem má však zpravidla větší hustotu, a tedy také větší objemovou výhřevnost. Požadavky na zvyšování cetanového čísla rostou se zpřísnujícími se emisními limity vznětových motorů. [8]

2.4.2 HUSTOTA NAFTY

Hustota nafty je dána především obsahem aromátů. Ovlivňuje výhřevnost paliva, která souvisí s typem uhlovodíků. Normalizovaná hodnota hustoty nafty je mezi 820 až 845 kg.m⁻³ při teplotě 15 °C. Jelikož je hustota nafty nižší než hustota vody (997 kg.m⁻³), tak se případná voda, vyskytující se v nádrži shromažďuje na dně nádrže. Hustota nafty se také používá pro přepočítání objemu na hmotnost a naopak. Mimo jiné slouží i k výpočtu cetanového indexu paliva a dá se z něj určit přibližné složení nafty. Měření hustoty se provádí například ponornými hustoměry nebo elektronickými přístroji. S rostoucí teplotou hustota nafty klesá. [8]

Vliv hustoty nafty:

Hustota nafty má vliv na výkon motoru. Je tomu tak proto, že vstřikovací čerpadlo pracuje objemově a tím pádem i množství vstřikovaného paliva roste s jeho měrnou hmotností. Všeobecně se udává, že s nárůstem hustoty o 0,01 g na 1 ml nafty vzroste výkon motoru o 0,4 % až 1,6 %. Měrná efektivní spotřeba paliva se vzrůstající hustotou klesá. S rostoucí teplotou nafty její hustota klesá.

V případě, že by se hustota nafty pohybovala pod dolní hranicí její normalizované hodnoty, hrozí poškození pohyblivých součástí palivové soustavy. Na pohyblivých součástech se totiž nevytváří mazací vrstva a dochází k jejich nadměrnému opotřebení.

Naopak při vyšší hustotě dochází ke zhoršení emisí motoru. Zhoršuje se tvorba směsi kvůli nedostatečné atomizaci paliva – nedokonalé spalování (kapičky paliva ohoří pouze na povrchu). Zejména při akceleračním režimu a režimu plného výkonu v emisích motoru roste podíl nespálených uhlovodíků, oxidu uhelnatého a sazí, což má za následek zvýšenou kouřivost. [8]

2.4.3 VISKOZITA NAFTY

Viskozita popisuje míru tekutosti nafty a má vliv na její mazivost a velikost kapiček paliva, vstříkovaného do válce. **Nízká viskozita** – nafta s nízkou viskozitou neulpívá na pohybových součástech palivového systému a snižuje tak mazivost, čímž dochází k jejich opotřebení a může dojít k zadření. Má pozitivní vliv na tvorbu aerosolu při vstříkování paliva. **Vysoká viskozita** – nafta s vysokou viskozitou se nedokáže dokonale rozptýlit, což může vést ke zhoršení čerpatelnosti nafty a jejímu zhoršenému průchodu přes filtry. Příliš vysoká viskozita nafty je příčinou tvorby karbonu, jelikož se ve válci nevytvoří dostatečně jemný aerosol. Dalším negativním účinkem příliš vysoké viskozity může být to, že v nízkotlakých systémech vstříkování způsobuje horší spalování a následný pokles výkonu, zvýšení spotřeby paliva a nárůst emisí. Normou dané rozmezí viskozity při teplotě 40 °C je 2 až 4,5 mm².s⁻¹. [8]

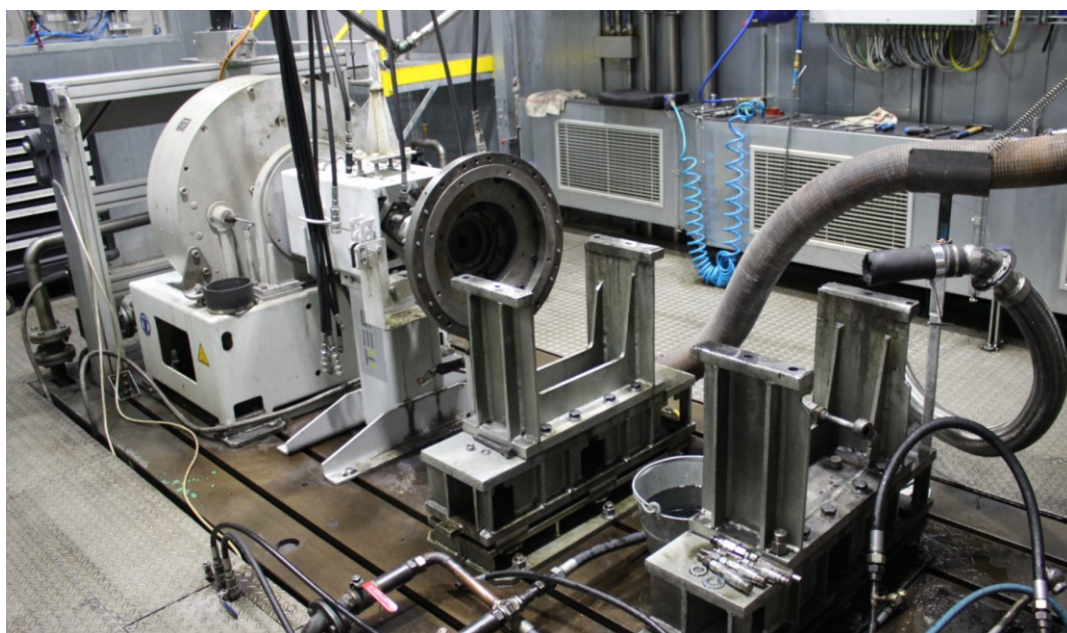
2.4.4 DALŠÍ PARAMETRY

Další parametry podle [8], které ovlivňují vlastnosti paliva jsou:

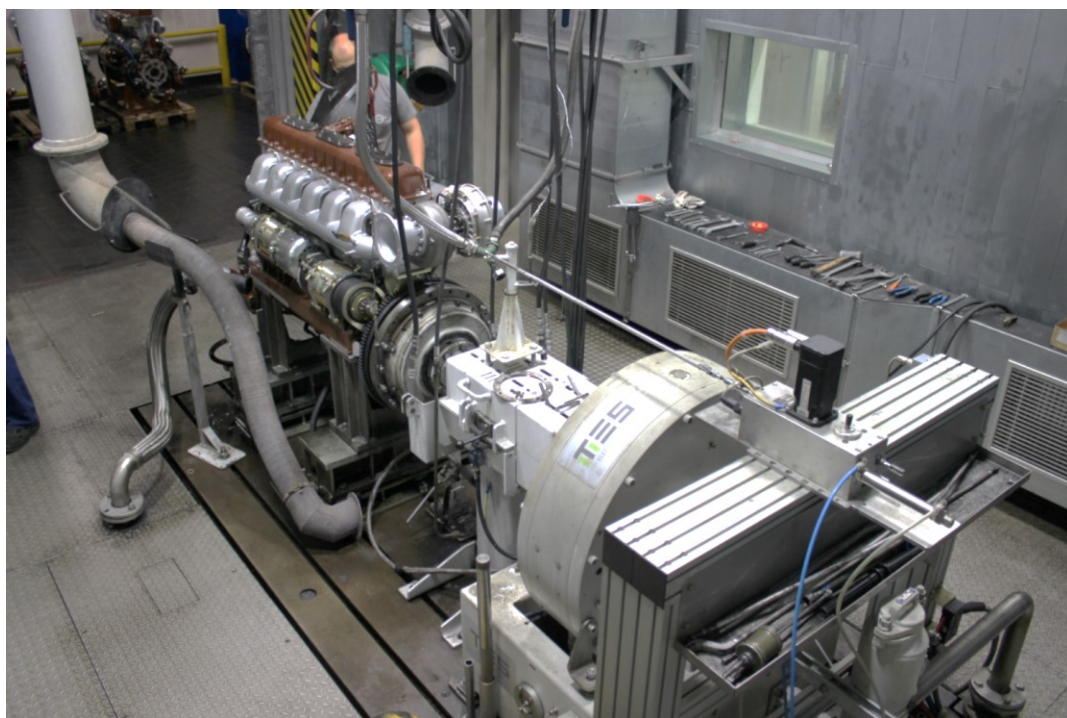
- obsah síry,
- bod vzplanutí,
- karbonizační zbytek,
- obsah vody,
- obsah mechanických nečistot,
- oxidační stálost,
- mazivost.

3 ZKUŠEBNÍ STANOVIŠTĚ

Zkušební motorové stanoviště využívá dynamometr řady VD (výrobce TES, typ WTS470 – Obr. 12, Obr. 13), který je určený pro zatěžování točivých strojů za současného měření otáček a krouticího momentu. Použití vířivých elektrických dynamometrů je vhodné tam, kde není požadován pohon zkoušeného zařízení a jsou požadovány malé zástavbové rozměry například při zkoušení spalovacích motorů, elektrických strojů apod. Obvykle jsou dynamometry VD vhodné pro oba směry otáčení. [18]



Obr. 12 Dynamometr WTS470 ve společnosti Excalibur Army Šternberk



Obr. 13 Dynamometr WTS470 ve společnosti Excalibur Army Šternberk

Vířivý dynamometr využívá pro svoji funkci účinků vířivých proudů. Rotor dynamometru je ve tvaru ozubeného kola. Uvnitř statoru je uložena budicí cívka, která je napájena z regulovaného zdroje. Otáčí-li se rotor v nabuzeném statoru, vznikají v povrchové vrstvě statoru pulzace magnetického toku, který indukují vířivé proudy. Tyto proudy vyvolávají brzdny moment, který se přenáší ramenem statoru na tenzometrický snímač síly. Přiváděná mechanická energie se mění v teplo, které musí být odvedeno chlazením dynamometru. Převážně je používáno vodní chlazení, kanály pro průtok upravené vody jsou ve statoru a ložiskových štítech. S ohledem na značné tepelné výkony odváděné chladicím médiem musí být zajištěna kontrola průtoku a teplota chladicího média. Je potřeba kontrolovat, aby ohřátá chladicí voda volně odtékala. Musí být zabezpečeno příslušné množství upravené chladicí vody, včetně čerpadel, chladicích věží apod. [18]

Na základovém rámu vířivého dynamometru je ve dvou ložiskových stojanech klyně uložen stator vířivého dynamometru. Stator je zhotoven z materiálu o dobré magnetické vodivosti. Uvnitř statoru je uložena budicí cívka. Rotor je vyroben z kované oceli ve tvaru ozubeného kola a je uložen ve valivých ložiskách. Brzdny moment, který je vyvolán vířivými proudy, je přenášen ramenem statoru na tenzometrický snímač síly, jehož signálu se využívá pro regulační účely a pro číslicové měření krouticího momentu. Na dynamometru je inkrementální snímač otáček a stator je opatřen snímatelnými cejchovacími rameny. Dynamometr je chlazen vodou a je opatřen hlídačem průtoku a filtrem hrubých nečistot. Kanály pro průtok chladicí vody jdou ve statoru a ložiskových štítech. Pro snížení korozních účinků jsou kanály pozinkovány. Na základovém rámu, na kterém je namontován dynamometr jsou dále umístěny: [18]

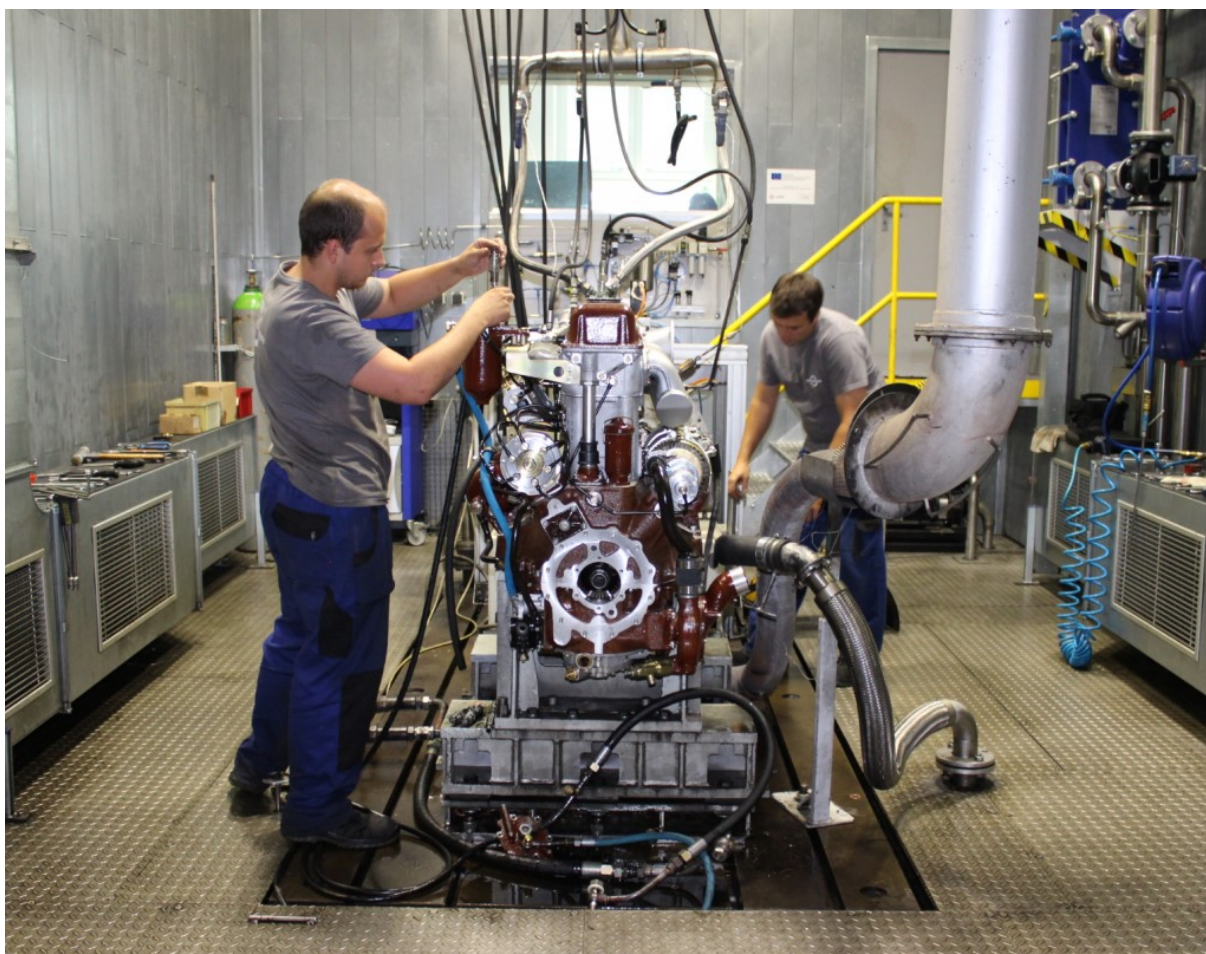
- tenzometrický snímač síly s převodníkem,
- přívod a odvod chladicí vody,
- odporové teploměry vody,
- svorkovnice,
- na dynamometru je umístěn snímač otáček,
- hlídač průtoku chladicího média (umístěn na přívodním potrubí),
- filtr hrubých nečistot (umístěn na přívodním potrubí před hlídačem průtoku).

Technické údaje:

- délka – 3840 mm,
- výška – 1710 mm,
- šířka (nutná šířka pro kalibraci) – 1590 mm (2335 mm),
- osová výška – 750 mm,
- váha – 2100 Kg,
- maximální výkon – 470 kW,
- maximální točivý moment – 2400 Nm,
- maximální otáčky – 7000 min⁻¹.

3.1 POSTUP PŘIPOJENÍ A SPUŠTĚNÍ ZKOUŠENÉHO MOTORU

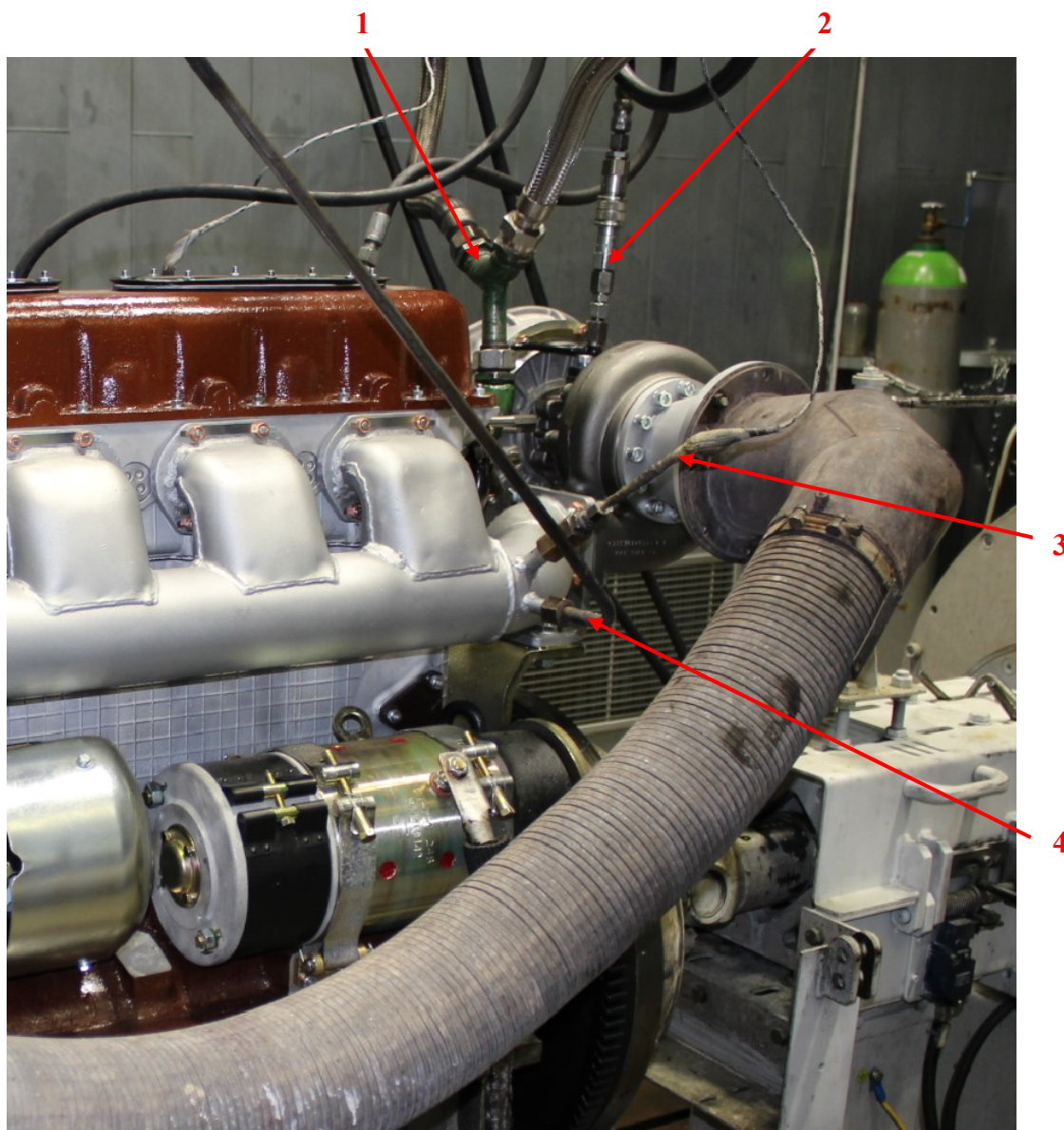
- ustavení motoru,
- připojení přívodů a odvodů všech provozních kapalin,
- přípevnění setrvačnicku k brzdě,
- připojení všech snímačů (kapitola 3.2),
- vizuální kontrola,
- start pro zaplnění palivové soustavy,
- kontrola předstříku (seřízení předstříku),
 - sundá se vstřikovací trubka na prvním válci,
 - protočení setrvačnicku až je na první trysce vidět hladina počátku vstříku – zjištění při jakém stupni začne první vstřikovač vstřikovat,
- druhý start,
 - čištění vnějšku motoru pomocí vody a servošamponu Rapid,
 - vizuální kontrola (za chodu),
 - volnoběžné otáčky,
- spuštění záběhu – automatická zkouška,
- seřízení motoru – otáčky, výkon, hlavní mazací tlak, moment,
 - vizuální kontrola motoru,
- spuštění zkoušky.



Obr. 14 – Příprava motoru ke zkoušce

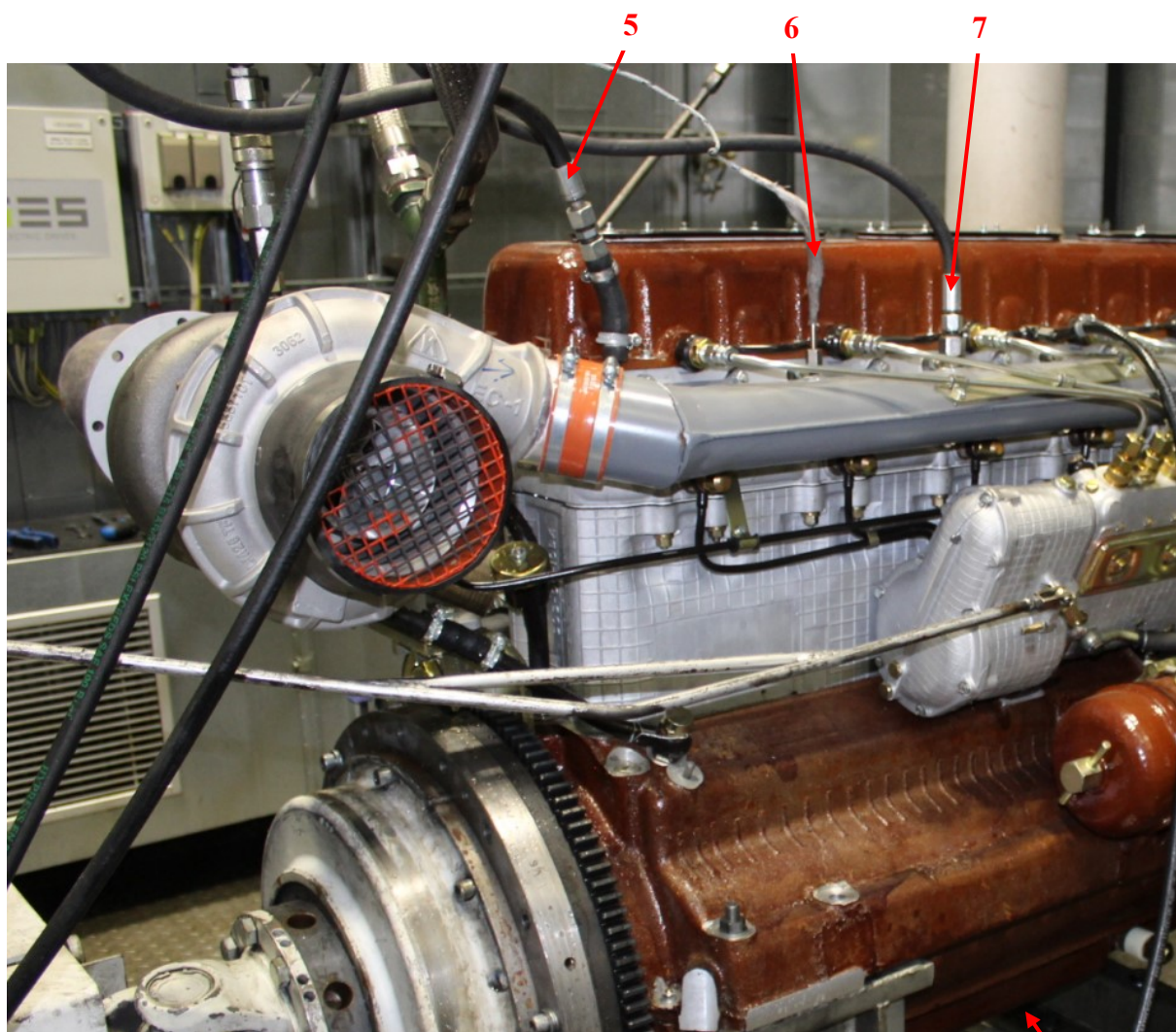
3.2 SNÍMAČE

Poté, co je motor ustaven, jsou připojeny veškeré přívody a odvody provozních kapalin a je setrvačnick připojen k dynamu, připojí se do motoru také veškeré snímače. Tyto snímače dávají informace do PC o stavu teploty a tlaku v jednotlivých částech motoru. Jednotlivé snímače jsou vyznačeny a popsány na Obr. 15, Obr. 16 a Obr. 17.



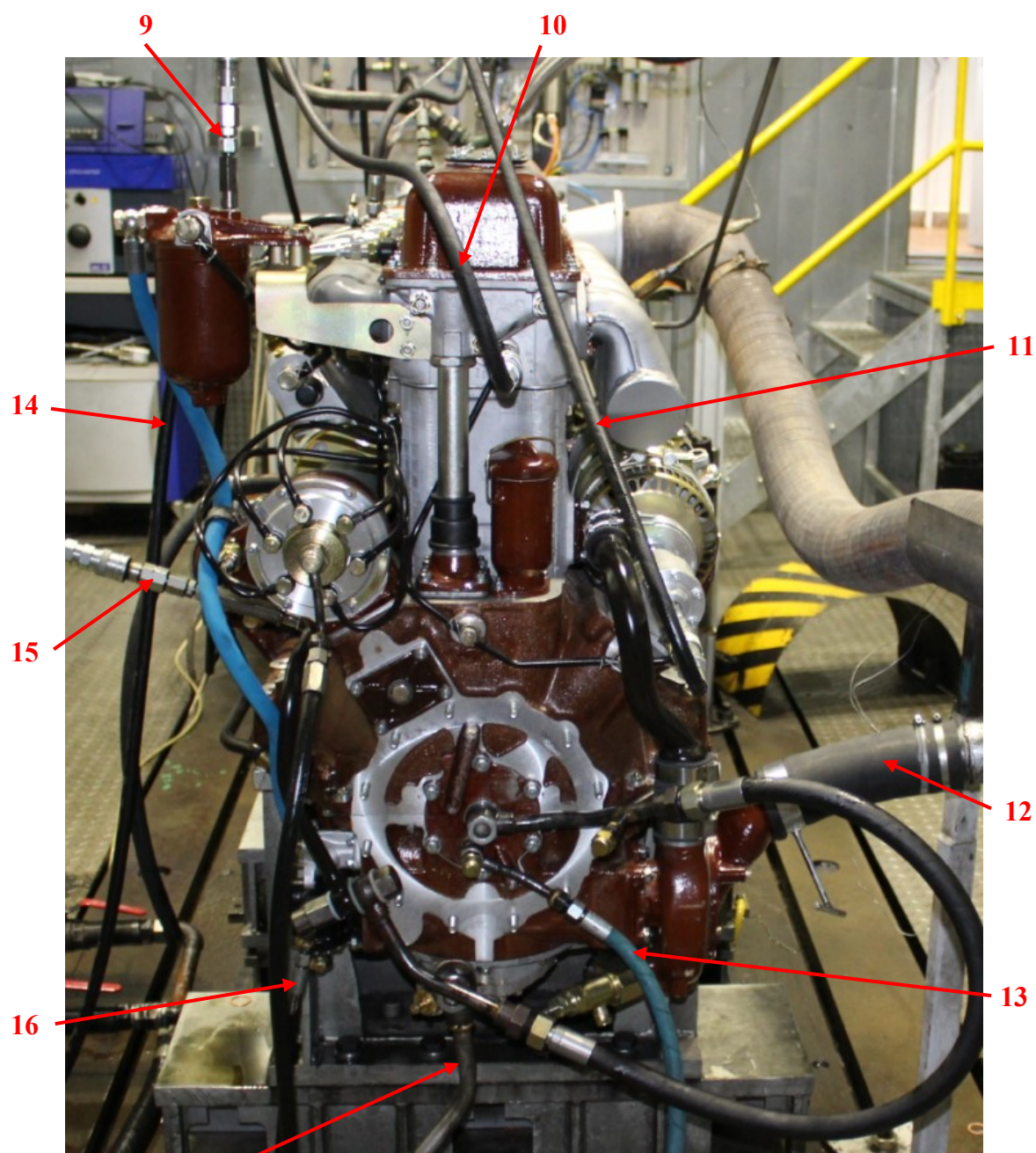
Obr. 15 Snímače motoru – strana výfuku

- 1 – Výstup chladicí kapaliny
- 2 – Snímač tlaku oleje turbodmychadla
- 3 – Snímač teploty ve výfuku
- 4 – Snímač tlaku ve výfuku



Obr. 16 Snímače motoru – strana sání

- 5 – Odvzdušnění
- 6 – Snímač teploty v sání
- 7 – Snímač tlaku v sání
- 8 – Výstup oleje



Obr. 17 Snímače motoru – přední část

- | | |
|--|----------------------------------|
| 9 – Snímač tlaku paliva | 14 – Přebad paliva z filtru |
| 10 – Snímač tlaku oleje na vačkové hřídeli | 15 – Snímač hlavního tlaku oleje |
| 11 – Snímač tlaku oleje dynama | 16 – Vstup paliva |
| 12 – Vstup chladicí kapaliny | 17 – Vstup oleje |
| 13 – Předmazání | |

3.3 KALIBRACE A PŘESNOSTI

Kalibrační protokol č. PR7090-04/17 [18]

Kalibrační stanoviště	WTS470 — box č. 3
Výrobní číslo	Z1418052.001/0001
Uživatel zařízení	EXCALIBURARMY Šternberk
Výrobce zařízení	TES VSETÍN s.r.o.
Přesnost měření	dle PR7090_T01, PR7090_K01 a údajů výrobce
Metodika kalibrace	- metodika porovnání se směrnici výrobce zařízení - substituční metoda toho samého
Podmínky prostředí	Teplota 17 °C ± 1 °C, Relativní vlhkost max. 80 %
Platnost kalibrace	dle metrologických předpisů uživatele

Periodická kalibrace zkušebního motorového stanoviště s dynamometrem WTS470 s měřícím a řídicím systémem CMS. Provedena kalibrace měření tlaků a teplot dle Kalibračního předpisu PR7090.

Kalibrace měření krouticího momentu a otáček provedena dle návodu výrobce zařízení.

Garantované přesnosti:

- otáčky ± 0,2 %,
- moment ± 0,2 %,
- tlak (DMP) ± 0,5 %,
- teplota ± 0,5 %,
- teplota (IFM) ± 1,0 %,
- napětí ± 1,0 %,
- vlhkost ± 3,5 %.

Nejistoty měření:

- teplota 0,02 % MH + 0,1 °C,
- odpor 0,02 % MH + 0,1 Q,
- proud 0,01 % MH + 0,003 mA,
- napětí 0,01 % MH + 0,0003 V,
- frekvence 0,01 % MH + 0,1 Hz,
- moment 0,05 % MH + 0,05 Nm
- vlhkost 0,05 % MH + 0,05 %

Porovnání s normou ČSN 30 2008

Podle ČSN 30 2008 by mělo být zkušební stanoviště vybaveno zařízením pro měření těchto hodnot: [10]

- točivého momentu s přesností $\pm 0,5 \%$ z maximální hodnoty uvedené na stupnici. Při měření plného výkonu se nesmí používat první čtvrtina stupnice dynamometru, přípouští se používání úseku mezi jednou šestinou a jednou čtvrtinou stupnice dynamometru, přitom však přesnost měření na tomto úseku stupnice musí být $\pm 0,25 \%$ z maximální hodnoty nanesené na stupnici,
- otáček klikového hřídele s přesností $\pm 0,5 \%$,
- spotřeby paliva s přesností $\pm 1 \%$,
- teploty nasávaného vzduchu s přesností $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$,
- teploty chladicí kapaliny s přesností $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$,
- teploty oleje s přesností $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$,
- teploty paliva s přesností $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$,
- teploty výfukových plynů s přesností $\pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$,
- teploty plynu (u plynových motorů) s přesností $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$,
- barometrického tlaku vzduchu s přesností $\pm 200 \text{ Pa}$ ($\pm 2 \text{ mbar}$),
- tlaku oleje s přesností $\pm 20 \text{ kPa}$,
- tlaku výfukových plynů s přesností $\pm 3 \%$,
- úhlu předstihu zapalování nebo vstřiku paliva s přesností $\pm 1^\circ$ otočení klikového hřídele,
- podtlaku v sacím potrubí nebo plnicího tlaku s přesností $\pm 50 \text{ Pa}$ ($\pm 5 \text{ mm vod.sl.}$).

4 KOREKCE

Jak již bylo zmíněno v kapitolách 2.3 a 2.4, výkonnost spalovacího motoru závisí na mnoha parametrech, ať už v závislosti na vlastnostech nasávaného vzduchu, nebo na vlastnostech paliva. Proto je nutné měřit motor za standardních atmosférických podmínek.

Pro srovnatelné výsledky je třeba vytvořit stejné podmínky měření. Měli bychom zachovat konstantní teploty vzduchu, paliva, oleje a chladicí kapaliny, stejně tak vlhkost a tlak vzduchu.

Normalizační instituce mají definované metody pro odhad výkonu motoru mimo referenčních podmínek. Nejznámější jsou následující:

- International Standards Organization (ISO), norma ISO 1585-1992,
- Society of Automotive Engineers (SAE), norma SAE J 1349-1990,
- European Community (ECE), norma TRANS/SC1/WP29/R34/Rev.1 ECE,
- Japanese Institute for Standardization (JIS), norma JIS D 1001-1993,
- Deutsche Industrie Norm (DIN), norma DIN 70020-1986

V ČR: Česká Státní Norma (ČSN), norma ČSN 30 2008

Normy pro korekci výkonu pro benzinové a vznětové motory jsou určeny pro automobilové, stacionární, lodní a jiné motory. Normy pro korekci výkonu jsou navrženy tak, aby odhadly výkon v nestandardních podmínkách. Nelze je však použít pro výpočet přesných výstupních hodnot. Čím větší jsou rozdíly v atmosférických podmínkách, tím větší je chyba v odhadu. Standardy vymezují limity použitelnosti těchto korekcí. Limit je okolo $\pm 7\%$, a proto musí korekční koeficient být v rozmezí od 0,93 do 1,07. Mimo tento rozsah, měření nejsou oficiálně použitelná. Korekce jsou použitelné pouze pro měření s plně otevřenou klapkou.

Na Obr. 18 jsou znázorněny jednotlivé vzorce pro výpočet korekčního koeficientu podle různých norem. Na tvar vzorce má kromě normy vliv také to, jestli se jedná o motor zážehový, vznětový, atmosférický, anebo přeplňovaný.

Norma	Plnění motoru	Druh motoru	Vztah pro korekční faktor
ČSN 30 2008	atmosférické	zážehový	$k = \frac{100}{p_b} \cdot \sqrt{\frac{T}{298}}$
ČSN 30 2008	atmosférické	vznětový	$k = \left(\frac{100}{p_b}\right)^{0,65} \cdot \sqrt{\frac{T}{298}}$
ČSN 30 2008	mechanické přeplňování	zážehový	$k = \frac{100}{p_b} \cdot \sqrt{\frac{T}{298}}$
ČSN 30 2008	mechanické přeplňování	vznětový	$k = \left(\frac{100}{p_b}\right)^{0,65} \cdot \sqrt{\frac{T}{298}}$
ČSN 30 2008	turbo	zážehový	$k = \frac{100}{p_b} \cdot \sqrt{\frac{T}{298}}$
ČSN 30 2008	turbo	vznětový	neprovádise
ISO DIN 1585	atmosférické	zážehový	$k = \left(\frac{99}{p_d}\right)^{1,2} \cdot \left(\frac{T}{298}\right)^{0,6}$
ISO DIN 1585	atmosférické	vznětový	$k = \frac{99}{p_d} \cdot \left(\frac{T}{298}\right)^{0,7}$
ISO DIN 1585	mechanické přeplňování	zážehový	$k = \left(\frac{99}{p_d}\right)^{1,2} \cdot \left(\frac{T}{298}\right)^{0,6}$
ISO DIN 1585	mechanické přeplňování	vznětový	$k = \frac{99}{p_d} \cdot \left(\frac{T}{298}\right)^{0,7}$
ISO DIN 1585	turbo	zážehový	$k = \left(\frac{99}{p_d}\right)^{1,2} \cdot \left(\frac{T}{298}\right)^{0,6}$
ISO DIN 1585	turbo	vznětový	$k = \frac{99}{p_d} \cdot \left(\frac{T}{298}\right)^{0,7}$
EHK R85	atmosférické	zážehový	$k = \left(\frac{99}{p_d}\right)^{1,2} \cdot \left(\frac{T}{298}\right)^{0,6}$
EHK R85	atmosférické	vznětový	$k = \frac{99}{p_d} \cdot \left(\frac{T}{298}\right)^{0,7}$
EHK R85	mechanické přeplňování	zážehový	$k = \left(\frac{99}{p_d}\right)^{1,2} \cdot \left(\frac{T}{298}\right)^{0,6}$
EHK R85	mechanické přeplňování	vznětový	$k = \frac{99}{p_d} \cdot \left(\frac{T}{298}\right)^{0,7}$
EHK R85	turbo	zážehový	$k = \left(\frac{99}{p_d}\right)^{1,2} \cdot \left(\frac{T}{298}\right)^{0,6}$
EHK R85	turbo	vznětový	$k = \left(\frac{99}{p_d}\right)^{0,7} \cdot \left(\frac{T}{298}\right)^{1,5}$

Obr. 18 Výpočty korekčních koeficientů podle různých norem [9]

4.1 NAMĚŘENÉ HODNOTY

Na motorové zkušebně v areálu firmy Excalibur Army ve Šternberku byla provedena série několika měření motoru PV6-K37. Cílem bylo získat co nejvíce informací o chodu motoru, zejména pak jeho vnější otáčková charakteristika, zátěžová charakteristika a charakteristika při změně otevření klapky. Měření bylo provedeno nejprve při nižší teplotě vzduchu a paliva. Tyto hodnoty byly brány jako referenční. Poté bylo měření opakováno, tentokrát při vyšší teplotě vzduchu a paliva, aby bylo možné porovnat jednotlivé jejich vlivy na výkon motoru. Data byla následně zpracována do tabulek, ze kterých se pak vycházelo při dalších výpočtech.

Na Obr. 19 je vidět ovládací místnost zkušebního stanoviště v areálu firmy Excalibur Army ve Šternberku.



Obr. 19 Zkušební stanoviště motorů firmy Excalibur Army Šternberk

V následujících výpočtech se budou objevovat indexy NT (nižší teplota) – referenční hodnoty a VT (vyšší teplota) – hodnoty naměřené ke korekci.

Naměřené hodnoty je potřeba nejprve ověřit výpočty. Pro ověření byly vybrány hodnoty při otáčkách motoru 1600 min⁻¹ (v **Tab. 2** označeny žlutě).

Tab. 2 Naměřené hodnoty vnější otáčkové charakteristiky – nižší teplota

n_m [min ⁻¹]	M_{t_NT} [Nm]	P_{e_NT} [kW]	t_{b_NT} [°C]	T_{b_NT} [K]	p_{b_NT} [kPa]	φ_{b_NT} [%]	m_{pe_NT} [g.kW ⁻¹ .h ⁻¹]	p_{pl_NT} [kPa]	T_{pl_NT} [°C]
900	1601	150,8	26,6	299,75	98,8	11,3	244,2	34,2	78
1000	1625	170,5	26,6	299,75	98,8	11,3	230,5	40,7	81
1100	1660	191,1	26,5	299,65	98,8	11,3	224,3	47,7	84
1200	1617	203,3	26,4	299,55	98,8	11,4	219,9	52,8	91
1300	1648	224,7	26,3	299,45	98,8	11,5	216	67,9	96
1400	1618	237,4	26,2	299,35	98,8	11,5	213,6	76,5	99
1500	1576	247,6	26,1	266,25	98,8	11,7	211,8	86,5	103
1600	1510	253,1	26	299,15	98,8	11,8	212	92,3	105
1700	1440	256,2	25,9	299,05	98,8	11,9	212,6	95,2	108
1800	1417	267,1	25,8	298,95	98,8	11,9	215,8	105,8	111
1900	1354	270	25,8	298,95	98,8	11,9	220,3	109,9	110
2000	1308	274	25,8	298,95	98,8	11,9	225	110,1	99

Průměrné hodnoty – nižší teplota:

- průměrná teplota: $T_{b_NT_průměr} = \frac{\sum T_{b_NT}}{12} = 299,317 \text{ K}$
- průměrný tlak: $p_{b_NT_průměr} = \frac{\sum p_{b_NT}}{12} = 98,8 \text{ kPa}$
- průměrná relativní vlhkost: $\varphi_{b_NT_průměr} = \frac{\sum \varphi_{b_NT}}{12} = 11,6 \%$

Tab. 3 Naměřené hodnoty vnější otáčkové charakteristiky – vyšší teplota

n_m [min ⁻¹]	M_{t_VT} [Nm]	P_{e_VT} [kW]	t_{b_VT} [°C]	T_{b_VT} [K]	p_{b_VT} [kPa]	φ_{b_VT} [%]	m_{pe_VT} [g.kW ⁻¹ .h ⁻¹]	p_{pl_VT} [kPa]	T_{pl_VT} [°C]
900	1541	145,6	40,7	313,85	98,7	6,8	249,4	32,7	87
1000	1572	165,5	40,5	313,65	98,8	6,8	234,8	29,3	92
1100	1607	185,1	40,4	313,55	98,8	6,9	228,3	47,2	94
1200	1558	196,2	40,3	313,45	98,8	7	224,2	52,2	97
1300	1591	217	40	313,15	98,8	7	218	65,5	107
1400	1558	228,6	39,8	312,95	98,8	7	215,9	73,6	111
1500	1531	240,3	39,6	312,75	98,8	7,1	214,6	83,8	117
1600	1468	246	39,4	312,55	98,7	7,2	215,2	91,5	121
1700	1406	250,1	39	312,15	98,7	7,4	216	95,8	126
1800	1390	261,9	38,8	311,95	98,7	7,6	217,1	108,4	132
1900	1333	265,9	38,6	311,75	98,7	7,7	221,5	113,8	135
2000	1295	271,6	38,3	311,45	98,7	7,8	223,9	116,5	133

Průměrné hodnoty – vyšší teplota:

- průměrná teplota: $T_{b_VT_průměr} = \frac{\sum T_{b_VT}}{12} = 312,767 \text{ K}$
- průměrný tlak: $p_{b_VT_průměr} = \frac{\sum p_{b_VT}}{12} = 98,75 \text{ kPa}$
- průměrná relativní vlhkost: $\varphi_{b_VT_průměr} = \frac{\sum \varphi_{b_VT}}{12} = 7,2 \%$

Další vstupní hodnoty:

$V_Z = 19,1$	[l]	- zdvihový objem (všech válců),
$\lambda = 1,7$	[-]	- součinitel přebytku vzduchu,
$Hu = 42,6$	[MJ·kg ⁻¹]	- výhřevnost paliva,
$\varepsilon = 15$	[-]	- kompresní poměr,
$r_s = 287,04$	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	- plynová konstanta,
$i = 2$	[-]	- počet otáček motoru na jeden pracovní cyklus (4T),
$L_t = 14,7$	[-]	- teor. potřebné množství vzduchu pro spálení 1 kg paliva.

4.1.1 ZÁKLADNÍ VÝPOČTY MOTORU:**Výkon motoru – jednodušší varianta:**

$$P_e = \omega \cdot M_t, \quad (9)$$

Dosazení:

$$P_e = 2 \cdot \pi \cdot n_m \cdot M_t = 2 \cdot \pi \cdot 1600 \cdot 1510 = 253 \text{ kW}$$

Kde:

P_e	[kW]	- efektivní výkon,
ω	[rad·s ⁻¹]	- úhlová rychlost,
n_m	[s ⁻¹]	- otáčky motoru,
M_t	[Nm]	- točivý moment motoru.

Hodnota vypočteného výkonu podle rovnice (9) v závislosti na otáčkách motoru a jeho momentu se liší pouze o 0,1 kW, což není velký rozdíl. Je však zapotřebí provést kontrolní výpočet v závislosti na dalších parametrech motoru pro ověření jeho účinnosti. Pro výpočty v dalších částech ale budeme pro přesnější výpočty počítat s původní naměřenou hodnotou výkonu, tedy 253,1 kW.

Výkon motoru – složitější varianta: [6]

$$P_e = V_Z \cdot \frac{n_m}{i} \cdot \frac{Hu}{\lambda \cdot L_t} \cdot \rho_{pl} \cdot \eta_{pl} \cdot \eta_e, \quad (10)$$

Kde:

ρ_{pl}	[kg·m ⁻³]	- hustota plnicího vzduchu,
η_{pl}	[%]	- plnicí účinnost,
η_e	[%]	- efektivní účinnost.

Střední efektivní tlak:

$$p_{se} = \frac{2 \cdot P_e}{V_Z \cdot n_m}, \quad (11)$$

Dosazení:

$$p_{se} = \frac{2 \cdot 253,1}{19,1 \cdot 1600} = 0,993 \text{ MPa}$$

Efektivní účinnost:

$$\eta_e = \frac{1}{m_{pe} \cdot Hu}, \quad (12)$$

Kde:

m_{pe} [g·kW⁻¹·h⁻¹] - měrná efektivní spotřeba paliva.

Dosazení:

$$\eta_e = \frac{1}{m_{pe} \cdot Hu} = \frac{1}{212 \cdot 42,6} = 0,399 = 39,9 \%$$

Spotřeba paliva:

$$m_p = m_{pe} \cdot P_e, \quad (13)$$

Dosazení:

$$m_p = m_{pe} \cdot P_e = 212 \cdot 253,1 = 0,015 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Hustota plnicího vzduchu:

$$\rho_{pl} = \frac{p_b + p_{pl}}{r \cdot T_{pl}}, \quad (14)$$

Kde:

p_b [kPa] - barometrický tlak,
 p_{pl} [kPa] - plnicí tlak,
 T_{pl} [K] - plnicí teplota.

Dosazení:

$$\rho_{pl} = \frac{p_b + p_{pl}}{r_s \cdot T_{pl}} = \frac{98,8 + 92,3}{287,04 \cdot 378,15} = 1,761 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3},$$

Spotřeba vzduchu:

$$V_V = V_Z \cdot \frac{n_m}{2}, \quad (15)$$

Dosazení:

$$V_V = V_Z \cdot \frac{n_m}{2} = 19,1 \cdot \frac{1600}{2} = 0,255 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Teoreticky možná hmotnost vzduchu ve válci motoru:

$$m_t = \rho_{pl} \cdot V_V, \quad (16)$$

Dosazení:

$$m_t = \rho_{pl} \cdot V_V = 1,761 \cdot 0,255 = 0,449 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Skutečná hmotnost vzduchu ve válci motoru:

$$m_s = m_p \cdot \lambda \cdot L_t, \quad (17)$$

Dosazení:

$$m_s = m_p \cdot \lambda \cdot L_t = 0,015 \cdot 1,7 \cdot 14,7 = 0,373 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Plnicí účinnost:

$$\eta_{pl} = \frac{m_s}{m_t}, \quad (18)$$

Dosazení:

$$\eta_{pl} = \frac{m_s}{m_t} = \frac{0,373}{0,449} = 0,83 = 83 \%$$

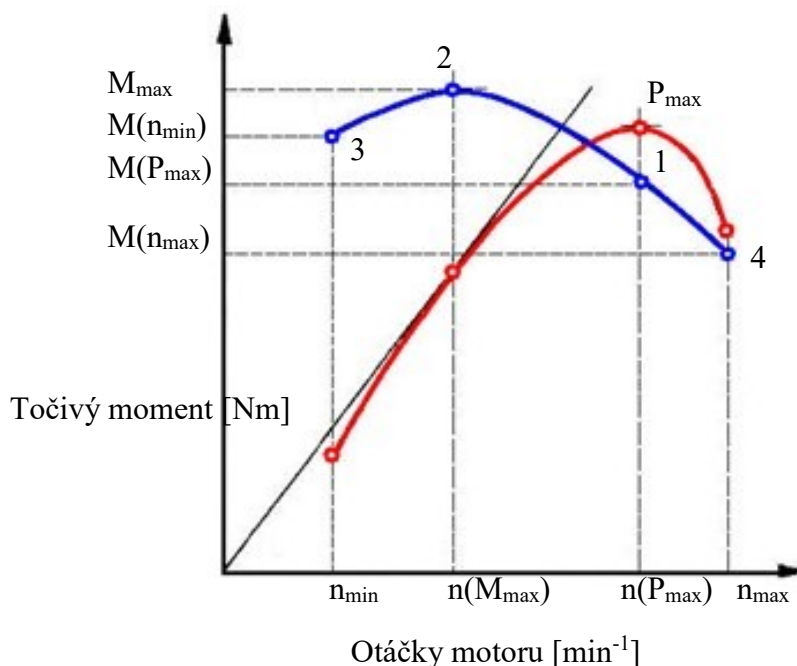
Zpětné dosazení do rovnice (10):

$$P_e = V_Z \cdot \frac{n_m}{i} \cdot \frac{Hu}{\lambda \cdot L_t} \cdot \rho_{pl} \cdot \eta_{pl} \cdot \eta_e = 19,1 \cdot \frac{1600}{2} \cdot \frac{42,6}{1,7 \cdot 14,7} \cdot 1,761 \cdot 0,83 \cdot 0,399 = 253,161 \text{ kW}$$

Rozdíl mezi naměřenou a vypočítanou hodnotou výkonu je pouze 0.061 kW. Lze tedy soudit, že vypočtené hodnoty účinnosti jsou správné.

4.1.2 VNĚJŠÍ OTÁČKOVÁ CHARAKTERISTIKA

Základní charakteristikou spalovacího motoru je vnější otáčková (rychlostní) charakteristika měřená při plném zatížení (Obr. 20). Znázorňuje závislost výkonu a ostatních důležitých veličin motoru na jeho otáčkách při stálém nastavení ovládacího zařízení (pedálu akcelérátoru) regulujícího výkon motoru. Rychlostní charakteristiky jsou nejpoužívanější nejen v odborných kruzích, ale jsou známy i motoristické veřejnosti. Vyskytují se jako součást technické dokumentace motorů, vozidel, pracovních strojů apod., v protokolech z měření, v propagačních materiálech a prospektech výrobců, respektive prodejců. Na vnější otáčkové charakteristice lze najít tyto 4 významné body. [9]



Obr. 20 Vnější otáčková charakteristika [9]

Významné body: [9]

Bod 1 je točivý moment při maximálním výkonu.

Bod 2 je maximální točivý moment.

Bod 3 je točivý moment při minimálních otáčkách motoru.

Bod 4 je točivý moment při maximálních otáčkách motoru.

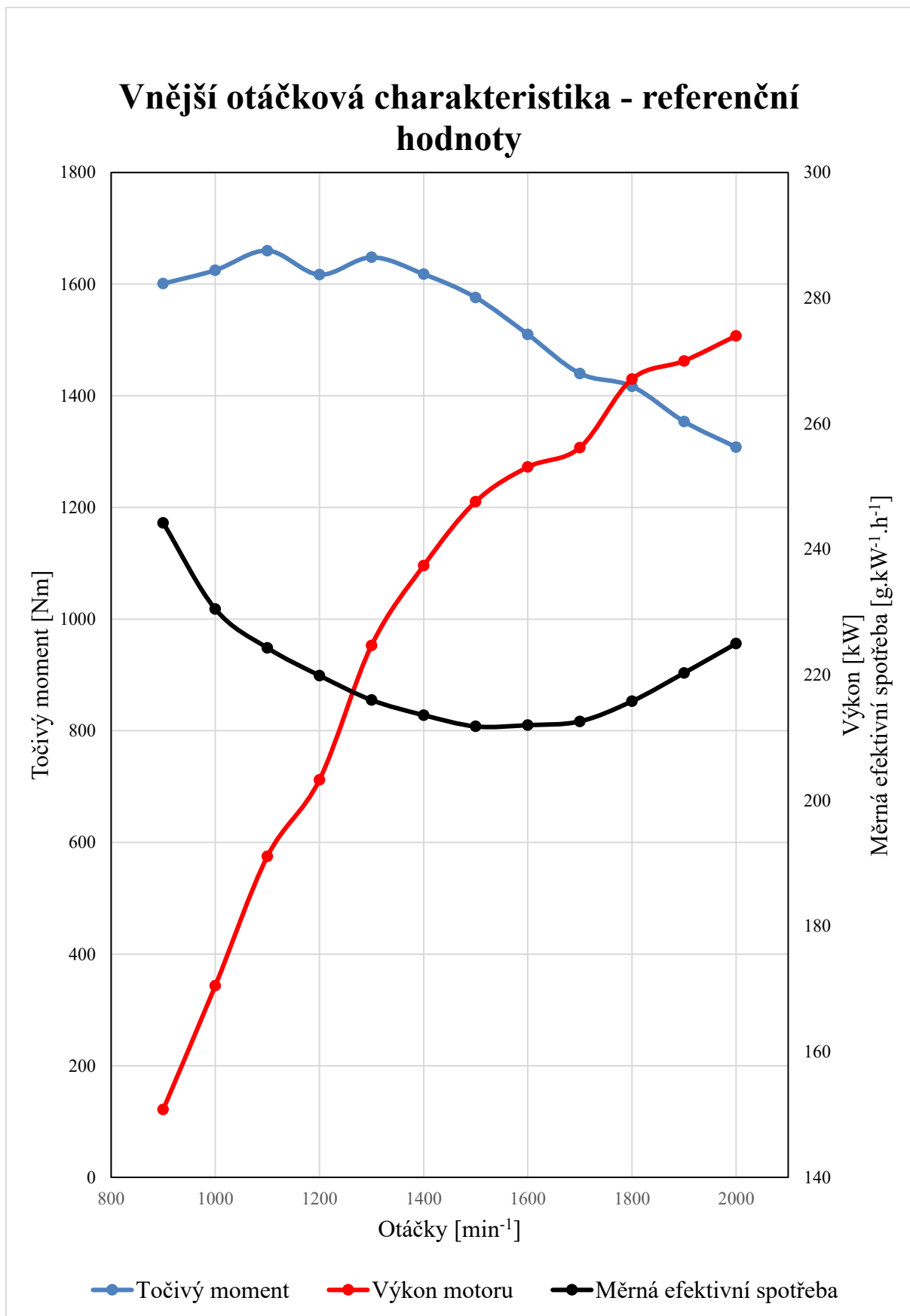
Pro úplnost informací ohledně motoru se do této charakteristiky přidává měrná efektivní spotřeba v závislosti na otáčkách motoru.

Vnější otáčková charakteristika zkoumaného motoru PV6-K37 v referenčním stavu (tedy při nižší teplotě) je znázorněna na Obr. 21. Měřena byla při následujících atmosférických podmínkách:

Teplota vzduchu: 26,17 °C

Relativní vlhkost vzduchu: 11,6 %

Tlak vzduchu: 98,8 kPa



Obr. 21 Vnější otáčková charakteristika motoru PV6-K37 – referenční stav

Vlastnosti vnější otáčkové charakteristiky motoru se vyjadřují několika ukazateli: [9]

Momentová pružnost

$$e_M = \frac{M_{max}}{M(P_{max})}, \quad (19)$$

Kde:

M_{max} [Nm] - maximální točivý moment,
 $M(P_{max})$ [Nm] - točivý moment při maximálním výkonu.

$$e_M = \frac{M_{max}}{M(P_{max})} = \frac{1660}{1308} = 1,269$$

Doporučené hodnoty: pro zážehové motory 1,07 – 1,50
 pro vznětové motory 1,03 – 1,35

Momentová pružnost je v doporučeném rozmezí pro vznětové motory.

Otáčková pružnost

$$e_n = \frac{n(P_{max})}{n(M_{max})}, \quad (20)$$

Kde:

$n(P_{max})$ [min⁻¹] - otáčky motoru při maximálním výkonu,
 $n(M_{max})$ [min⁻¹] - otáčky motoru při maximálním točivém momentu.

$$e_n = \frac{n(P_{max})}{n(M_{max})} = \frac{2000}{1100} = 1,818$$

Doporučené hodnoty: pro zážehové motory 1,5 – 3,5
 pro vznětové motory 1,3 – 2,0

Otáčková pružnost je v doporučeném rozmezí pro vznětové motory.

Celková pružnost motoru

$$e_m = e_M \cdot e_n, \quad (21)$$

$$e_m = e_M \cdot e_n = 1,269 \cdot 1,818 = 2,307$$

Doporučené hodnoty: pro zážehové motory 1,6 – 5,25
 pro vznětové motory 1,34 – 2,7

Celková pružnost je v doporučeném rozmezí pro vznětové motory.

4.2 KOREKCE NA ATMOSFÉRICKÉ PODMÍNKY

Tato kapitola pojednává pouze o vlivu atmosférických podmínek vzduchu na výkon motoru. Zahrnutí společného vlivu s vlastnostmi paliva je popsáno v kapitole 4.4.

4.2.1 KOREKČNÍ KOEFICIENT

$$K = \left(\frac{p_{b_VT} - a \cdot \varphi_{b_VT} \cdot p_{p_VT}}{p_{b_NT} - a \cdot \varphi_{b_NT} \cdot p_{b_NT}} \right)^m \cdot \left(\frac{T_{b_VT}}{T_{b_NT}} \right)^n \cdot \left(\frac{T_{w_VT}}{T_{w_NT}} \right)^q \quad (22)$$

Kde:

K	[-]	- korekční koeficient,
$a, m,$	[-]	- koeficienty přepočtových vztahů pro odhad vlivu atmosférických podmínek,
n, q	[-]	- koeficienty přepočtových vztahů pro odhad vlivu atmosférických podmínek,
p_p	[kPa]	- tlak nasycených vodních par při teplotě T_b ,
T_w	[K]	- teplota chladicího média na vstupu do chladiče plicního vzduchu,
φ_b	[-]	- relativní vlhkost vzduchu,

Podle [5] se pro motory vznětové přepřlňované předpokládá, že vliv vlhkosti nasávaného vzduchu je zanedbatelný. Proto koeficient a je roven nule. Stejně tak pro případ, kdy se jedná o přepřlňovaný motor, který není vybaven mezichladičem stlačeného vzduchu (tzv. intercooleru) je možné vypustit i poslední člen rovnice. Ostatní koeficienty (m a n) jsou voleny podle tabulky Tab. 4. Celou rovnicí (25) je tedy možné zkrátit do finální podoby:

$$K = \left(\frac{p_{b_kor}}{p_{b_ref}} \right)^m \cdot \left(\frac{T_{b_kor}}{T_{b_ref}} \right)^n$$

Jednotlivé koeficienty je možné určit z tabulky uvedené níže (Tab. 4). Důležité pro správné určení je zvolení správného typu motoru a jeho přepřlňování, případně chlazení stlačeného vzduchu. V tabulce je také vidět orientační nárůst nebo pokles výkonu v závislosti na změnách atmosférických podmínek.

Tab. 4 Koeficienty přepočtových vztahů pro odhad vlivu atmosférických podmínek [9]

Druh motoru	Konstanty				Změna atmosférického stavu a teploty vody			Přibližná změna výkonu [%]
	<i>a</i>	<i>m</i>	<i>n</i>	<i>q</i>	<i>b</i> ± 1 kPa	<i>t_t</i> ± 5°C	<i>t_w</i> ± 5°C	
Benzínový motor	1	1	0,5	0	±1,30	±1,10	-	
Naftový motor o výkonu omezeném součinitelem přebytku vzduchu,	1	1	0,75	0	±1,20	±1,50	-	
tepelným namáháním	0	1	1	0	±1,20	±2,00	-	
Naftový motor přepřínovaný bez mezichladiče,	0	0,7	2	0	±1,95	±4,00	-	
s mezichladičem vzduchu	0	0,7	1,2	1	±1,9	±2,40	±2,00	

Jelikož se v našem případě jedná o naftový motor přepřínovaný, bez mezichladiče, byly podle Tab. 4 zvoleny hodnoty $m = 0,7$ a $n = 2$. Tyto hodnoty jsou však pouze orientační a nemusí být úplně přesné pro konkrétní typ motoru. Je proto dobré je případně upravit tak, aby vzorec co nejlépe odpovídal chování daného motoru.

Dosazení do zkrácené rovnice (22):

Vstupní hodnoty:

$$K = \left(\frac{p_{b_VT}}{p_{b_NT}} \right)^m \cdot \left(\frac{T_{b_VT}}{T_{b_NT}} \right)^n = \left(\frac{98,75}{98,8} \right)^{0,7} \cdot \left(\frac{312,767}{299,317} \right)^2 = 1,092$$

Pro přepočet užitečného výkonu s uvažováním změny mechanické účinnosti se pak dále doporučuje použít vztah (23):

$$P_{e_kor} = P_{e_VT} \cdot \left[K - 0,7 \cdot (1 - K) \cdot \left(\frac{1}{\eta_m} - 1 \right) \right], \quad (23)$$

Kde:

η_m [-] - mechanická účinnost motoru.

Dosazení:

Za P_{e_VT} , budou postupně dosazovány hodnoty výkonu z Tab. 3 pro otáčky 900 min^{-1} až 2000 min^{-1} .

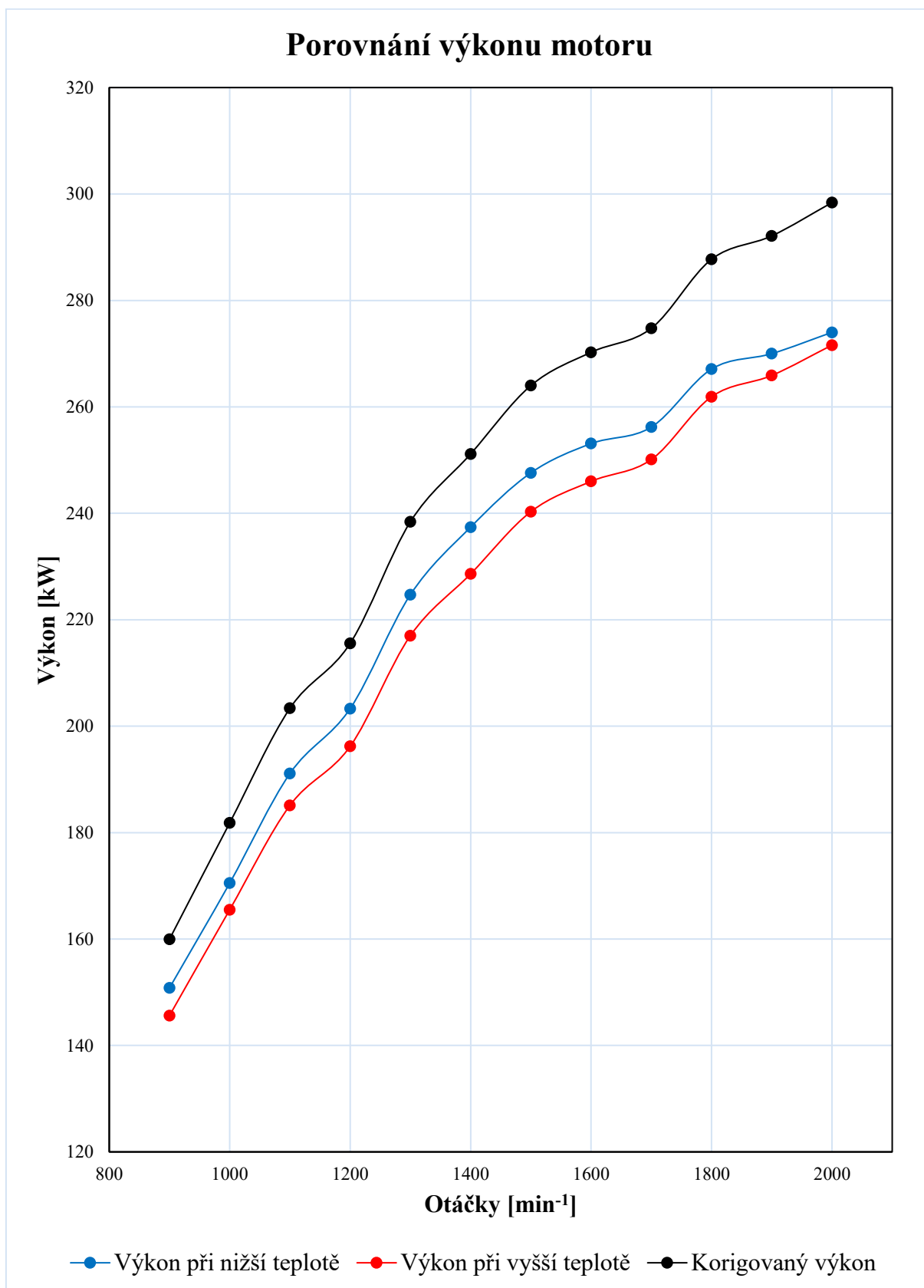
$$P_{e_kor} = P_{e_VT} \cdot \left[K - 0,7 \cdot (1 - K) \cdot \left(\frac{1}{\eta_m} - 1 \right) \right] = P_{e_VT} \cdot \left[1,092 - 0,7 \cdot (1 - 1,092) \cdot \left(\frac{1}{0,9} - 1 \right) \right]$$

Vypočtené hodnoty pro jednotlivé otáčky jsou vypsány v Tab. 5.

Tab. 5 Tabulka výsledků výpočtu korigovaného výkonu

Otáčky motoru [min⁻¹]	Vypočítaný korigovaný výkon motoru [kW]
900	159,959
1000	181,822
1100	203,355
1200	215,549
1300	238,401
1400	251,145
1500	263,999
1600	270,261
1700	274,765
1800	287,729
1900	292,123
2000	298,385

Grafické znázornění porovnání jednotlivých výkonů motoru:



Obr. 22 Graf porovnání jednotlivých výkonů motoru

Jak je vidět v grafu (Obr. 22), průběh korigovaného výkonu je poněkud vzdálený od průběhu výkonu při nižší teplotě, tedy výkonu referenčního. Je proto potřeba upravit hodnotu exponentu n v rovnici (24) tak, aby byl průběh korigovaného výkonu co nejbližší průběhu výkonu referenčního. Pro zjištění nejmenší odchylky rozdílů hodnot se využije metody nejmenších čtverců. Upravovat exponent m nemá smysl, protože rozdíl mezi jednotlivými tlaky zanedbatelný.

Metoda nejmenších čtverců – MNČ (least squares method – LSM):

Pomocí metody nejmenších čtverců je možné nalézt takovou hodnotu exponentu n , pro kterou bude suma čtverců odchylek nejmenší od referenční křivky (křivka výkonu při nižší teplotě). Obecně lze vycházet z rovnice (24):

$$MNČ = \sum (P_{e_ref} - P_{e_kor})^2, \quad (24)$$

Kde:

P_{e_ref} [kW] - referenční hodnota výkonu, neboli P_{e_NT} ,

P_{e_kor} [kW] - hodnota korigovaného výkonu.

Pro $n=2$:

Za hodnoty P_{e_ref} a P_{e_kor} budou postupně dosazovány hodnoty z Tab. 2 a Tab. 5.

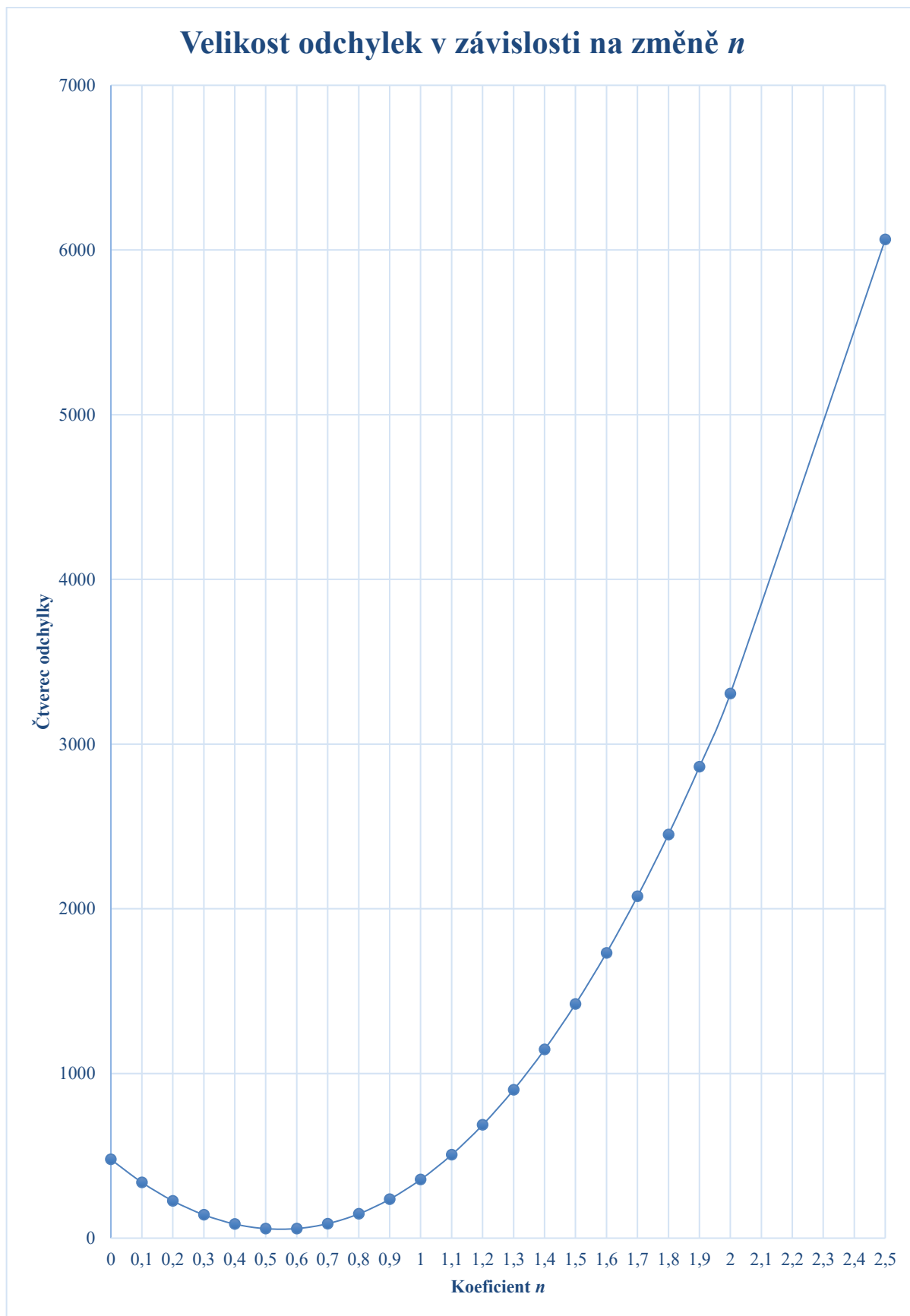
$$MNČ_{n=2} = \sum (P_{e_ref} - P_{e_kor})^2 = 3307$$

Nyní je zapotřebí najít takové n , pro které bude suma čtverců odchylek nejmenší. Princip výpočtu odchylky byl pro všechno hodnoty n stejný jako pro $n = 2$. Tedy podle rov. (24).

Tab. 6 Závislost velikosti odchylky na koeficientu n

n	odchylka	n	odchylka
0	477,933	1,1	506,195
0,1	338,611	1,2	687,473
0,2	226,545	1,3	900,25
0,3	142,103	1,4	1145
0,4	85,653	1,5	1422
0,5	57,57	1,6	1732
0,6	58,231	1,7	2075
0,7	88,019	1,8	2451
0,8	147,317	1,9	2862
0,9	236,516	2	3307
1	356,01	2,5	6064

Na základě výpočtů v programu MathCAD, bylo zjištěno, že nejmenší odchylka při použití $n = 0,5$ (Obr. 23). Výsledky jsou znázorněny v Tab. 6 a graficky na Obr. 23.

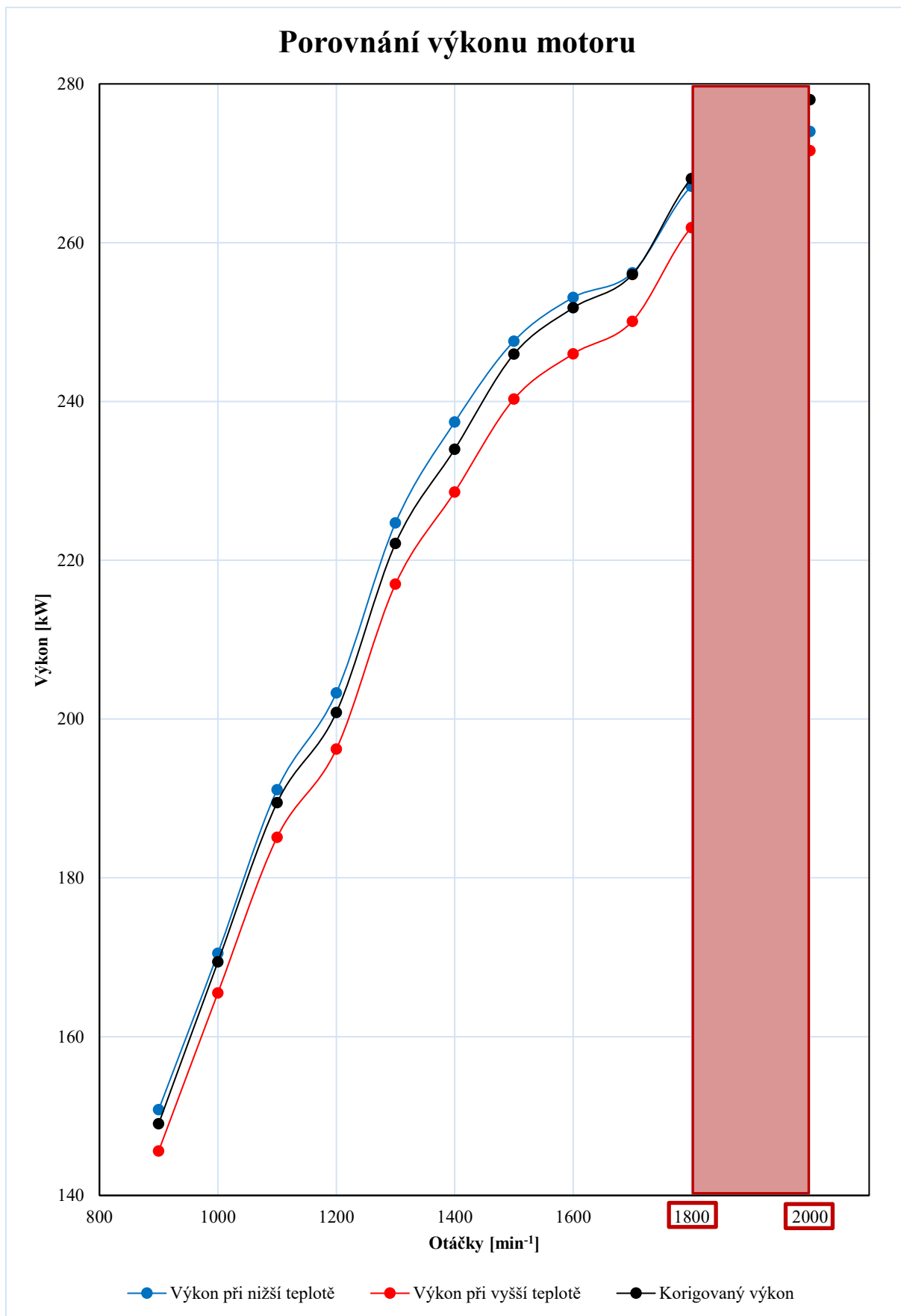


Obr. 23 Závislost čtverce odchylky na koeficientu n

Hodnoty korigovaného výkonu v závislosti na otáčkách motoru (do 2000 min⁻¹ jsou uvedeny v Tab. 7.)

Tab. 7 Korigovaný výkon v závislosti na otáčkách motoru

Otáčky motoru [min⁻¹]	Korigovaný výkon motoru [kW]
900	149,03
1000	169,399
1100	189,461
1200	200,822
1300	222,112
1400	233,986
1500	245,961
1600	251,795
1700	255,992
1800	268,07
1900	272,164
2000	277,999



Obr. 24 Graf porovnání výkonů motoru

Jak je vidět (Obr. 24), nyní se průběh korigovaného výkonu přiblížil nejvíce k referenčnímu výkonu. Od určitých otáček motoru (1800 min^{-1} – vyznačená část) můžeme ale sledovat znatelný rozptyl hodnot. Tento rozptyl je s největší pravděpodobností způsoben tím, že při vyšších otáčkách nejsme schopni do spalovacího prostoru dodávat potřebné množství vzduchu. Tyto hodnoty tedy nejsou přesné a negativně ovlivňují zbývající část. Proto je můžeme z výpočtu vypustit. Nyní je ale potřeba vypočítat nový koeficient k , který přiblíží hodnoty korigovaného výkonu ještě blíže k hodnotám referenčním.

Dále se tedy bude počítat jen do otáček 1800 min^{-1} (Tab. 8 a Tab. 9).

Tab. 8 Naměřené hodnoty vnější otáčkové charakteristiky do 1800 min^{-1} - nižší teplota

n_m [min^{-1}]	M_{t_NT} [Nm]	P_{e_NT} [kW]	t_{b_NT} [$^{\circ}\text{C}$]	T_{b_NT} [K]	p_{b_NT} [kPa]	φ_{b_NT} [%]	m_{pe_NT} [$\text{g}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$]	p_{pl_NT} [kPa]	T_{pl_NT} [$^{\circ}\text{C}$]
900	1601	150,8	26,6	299,75	98,8	11,3	244,2	34,2	78
1000	1625	170,5	26,6	299,75	98,8	11,3	230,5	40,7	81
1100	1660	191,1	26,5	299,65	98,8	11,3	224,3	47,7	84
1200	1617	203,3	26,4	299,55	98,8	11,4	219,9	52,8	91
1300	1648	224,7	26,3	299,45	98,8	11,5	216	67,9	96
1400	1618	237,4	26,2	299,35	98,8	11,5	213,6	76,5	99
1500	1576	247,6	26,1	266,25	98,8	11,7	211,8	86,5	103
1600	1510	253,1	26	299,15	98,8	11,8	212	92,3	105
1700	1440	256,2	25,9	299,05	98,8	11,9	212,6	95,2	108
1800	1417	267,1	25,8	298,95	98,8	11,9	215,8	105,8	111

Je také potřeba přepočítat znovu průměrné hodnoty:

Průměrné hodnoty – nižší teplota:

- průměrná teplota: $T_{b_NT_průměr} = \frac{\sum T_{b_NT}}{10} = 299,39 \text{ K} (= 26,24^{\circ}\text{C})$
- průměrný tlak: $p_{b_NT_průměr} = \frac{\sum p_{b_NT}}{10} = 98,8 \text{ kPa}$
- průměrná relativní vlhkost: $\varphi_{b_NT_průměr} = \frac{\sum \varphi_{b_NT}}{10} = 11,6 \%$

Tab. 9 Naměřené hodnoty vnější otáčkové charakteristiky do 1800 min^{-1} - vyšší teplota

n_m [min^{-1}]	M_{t_VT} [Nm]	P_{e_VT} [kW]	t_{b_VT} [$^{\circ}\text{C}$]	T_{b_VT} [K]	p_{b_VT} [kPa]	φ_{b_VT} [%]	m_{pe_VT} [$\text{g}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$]	p_{pl_VT} [kPa]	T_{pl_VT} [$^{\circ}\text{C}$]
900	1541	145,6	40,7	313,85	98,7	6,8	249,4	32,7	87
1000	1572	165,5	40,5	313,65	98,8	6,8	234,8	29,3	92
1100	1607	185,1	40,4	313,55	98,8	6,9	228,3	47,2	94
1200	1558	196,2	40,3	313,45	98,8	7	224,2	52,2	97
1300	1591	217	40	313,15	98,8	7	218	65,5	107
1400	1558	228,6	39,8	312,95	98,8	7	215,9	73,6	111
1500	1531	240,3	39,6	312,75	98,8	7,1	214,6	83,8	117
1600	1468	246	39,4	312,55	98,7	7,2	215,2	91,5	121
1700	1406	250,1	39	312,15	98,7	7,4	216	95,8	126
1800	1390	261,9	38,8	311,95	98,7	7,6	217,1	108,4	132

Průměrné hodnoty – vyšší teplota:

- průměrná teplota: $T_{b_VT_průměr} = \frac{\sum T_{b_VT}}{12} = 313 \text{ K} (= 39,85 \text{ °C})$
- průměrný tlak: $p_{b_VT_průměr} = \frac{\sum p_{b_VT}}{12} = 98,76 \text{ kPa}$
- průměrná relativní vlhkost: $\varphi_{b_VT_průměr} = \frac{\sum \varphi_{b_VT}}{12} = 7,1 \%$

Jak již bylo zmíněno výše, je potřeba přepočítat nový koeficient n tak, aby byla odchylka co nejmenší. Jak je ale patrné z průběhu grafu na Obr. 23, pro usnadnění výpočtu je možné z vypustit hodnoty vyšší, než je $n = 1$. Za touto hranicí totiž dochází k velkému nárůstu odchylek. Výpočet funguje na stejném principu, jako v předchozím případě. Vychází se tedy i ze stejných rovnic. Metodou nejmenších čtverců bylo zjištěno, že nejmenší suma odchylek je pro koeficient $n = 0,6$.

Výsledky jsou znázorněny v Tab. 10 a graficky na Obr. 25.

Tab. 10 Závislost velikosti odchylky na koeficientu n

Koeficient n	Čtverec odchylky
0	454,011
0,1	328,494
0,2	223,743
0,3	140,038
0,4	77,66
0,5	36,897
0,6	18,036
0,7	21,368
0,8	47,189
0,9	95,795
1	167,488



Obr. 25 Závislost velikosti čtverce odchylky na koeficientu n

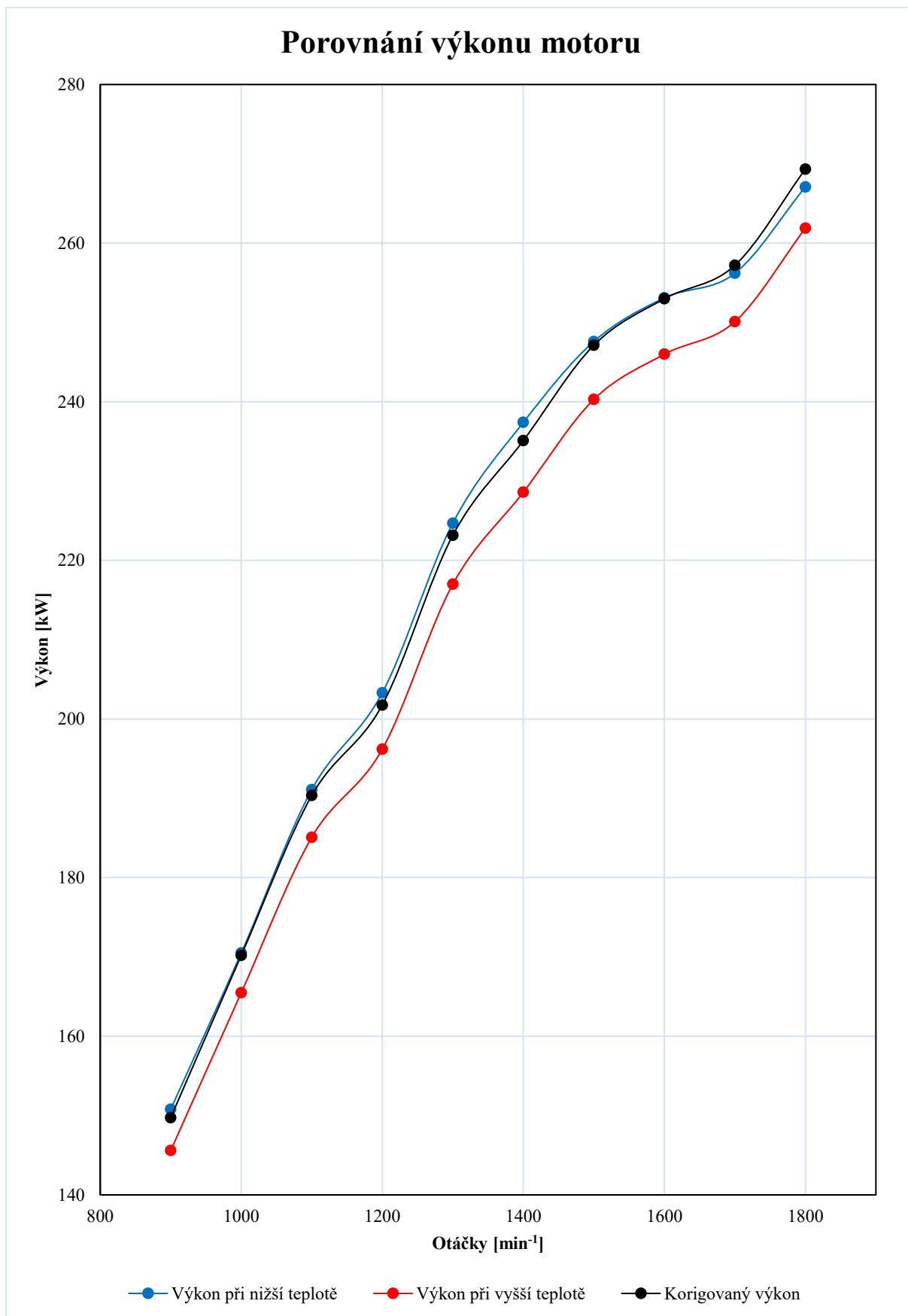
Nový korekční koeficient K je tedy:

$$K = \left(\frac{p_{b_VT}}{p_{b_NT}}\right)^m \cdot \left(\frac{T_{b_VT}}{T_{b_NT}}\right)^n = \left(\frac{98,75}{98,8}\right)^{0,7} \cdot \left(\frac{313}{299,39}\right)^{0,6} = 1,027$$

Korigovaný výkon přepočítaný s novým korekčním koeficientem pro otáčky od 900 min^{-1} do 1800 min^{-1} :

Tab. 11 Korigovaný výkon v závislosti na otáčkách motoru

Otáčky motoru [min^{-1}]	Korigovaný výkon motoru [kW]
900	149,737
1000	170,202
1100	190,359
1200	201,774
1300	223,165
1400	235,095
1500	247,127
1600	252,989
1700	257,205
1800	269,341



Obr. 26 Graf porovnání výkonů motoru (do otáček 1800 min⁻¹)

4.2.2 POROVNÁNÍ S DALŠÍMI NORMAMI

Korekce podle normy ISO DIN 1585: [12]

Korekční koeficient K , kterým se následně násobí počítaný výkon (v našem případě při vyšší teplotě) se dá vypočítat podle normy ISO DIN 1585 podle rovnice (25) takto:

$$K_{ISO} = \frac{99}{p_{b_VT}} \cdot \left(\frac{T_{b_VT}}{298} \right)^{0,7}, \quad (25)$$

Kde:

p_{b_VT} [kPa] - průměrný tlak vzduchu při měření s vyšší teplotou (Tab. 9)
 T_{b_VT} [K] - průměrná teplota vzduchu při měření s vyšší teplotou (Tab. 9)

$$K_{ISO} = \frac{99}{p_{b_VT}} \cdot \left(\frac{T_{b_VT}}{298} \right)^{0,7} = \frac{99}{98,76} \cdot \left(\frac{313}{298} \right)^{0,7} = 1,037$$

Po vynásobení výkonu naměřeného při vyšší teplotě (rov. 26), dostaneme výkon korigovaný podle normy ISO DIN 1585.

$$P_{ISO} = P_{e_VT} \cdot K_{ISO}, \quad (26)$$

Kde:

P_{e_VT} [kW] - výkon motoru naměřený při vyšší teplotě vzduchu (Tab. 9).

$$P_{ISO} = P_{e_VT} \cdot K_{ISO} = P_{e_VT} \cdot 1,037$$

Výsledky výpočtu podle normy ISO jsou uvedeny v Tab. 12.

Tab. 12 Korigovaný výkon podle normy ISO DIN 1585

Otáčky motoru [min ⁻¹]	Korigovaný výkon motoru ISO [kW]
900	151,06
1000	171,7
1100	192,04
1200	203,56
1300	225,14
1400	237,17
1500	249,31
1600	255,22
1700	259,48
1800	271,72

Korekce podle normy SAE J1349: [11]

Další možností je výpočet korigovaného výkonu podle americké normy SAE. Nejprve je však zapotřebí vypočítat korekční koeficient CA podle rovnice (27).

V této části bude použit styl značení některých veličin podle normy SAE J1349.

$$P_{SAE} = P_{e_{VT}} \cdot CA, \quad (27)$$

Kde:

CA [-] - korekční koeficient podle normy SAE

$$CA = Fa^{Fm}, \quad (28)$$

Výpočet Fa :

$$Fa = \left(\frac{99}{p_{b_{VT}}} \right)^\alpha \cdot \left(\frac{T_{b_{VT}}}{298} \right)^\beta, \quad (29)$$

Kde:

α, β [-] - korekční exponenty volené podle normy SAE
(pro přeplňovaný vznětový motor bez mezichladiče platí:
 $\alpha = 0,7$ a $\beta = 1,2$)

$$Fa = \left(\frac{99}{p_{b_{VT}}} \right)^\alpha \cdot \left(\frac{T_{b_{VT}}}{298} \right)^\beta = \left(\frac{99}{98,76} \right)^{0,7} \cdot \left(\frac{313}{298} \right)^{1,2} = 1,063$$

Koeficient Fm , označovaný podle normy SAE jako faktor motoru, závisí na poměru Q/R . Závislost je vyjádřena v Tab. 13.

Tab. 13 Závislost velikosti faktoru motoru na poměru Q/R [11]

Poměr Q/R	Fm
$Q/R < 37,2$	0,2
$37,2 < Q/R < 65$	$(0,036 \cdot Q/R) - 1,14$
$65 > Q/R$	1,2

Následující výpočty byly provedeny ve výpočetním programu Mathcad.

Výpočet Q :

$$Q = 120000 \cdot \frac{F}{D \cdot N}, \quad (30)$$

Kde:

F [$g \cdot s^{-1}$] - hmotnostní spotřeba paliva

D [l] - zdvihový objem motoru

N [min^{-1}] - otáčky motoru

Výpočet R:

$$R = \frac{p_{pl}}{p_b}, \quad (31)$$

Kde:

p_{pl}	[kPa]	- hodnota plnicího tlaku motoru
p_b	[kPa]	- hodnota tlaku vzduchu v okolí

Vypočtené hodnoty a jejich poměr jsou vypsány v Tab. 14.

Tab. 14 Hodnoty Q , R a poměru Q/R

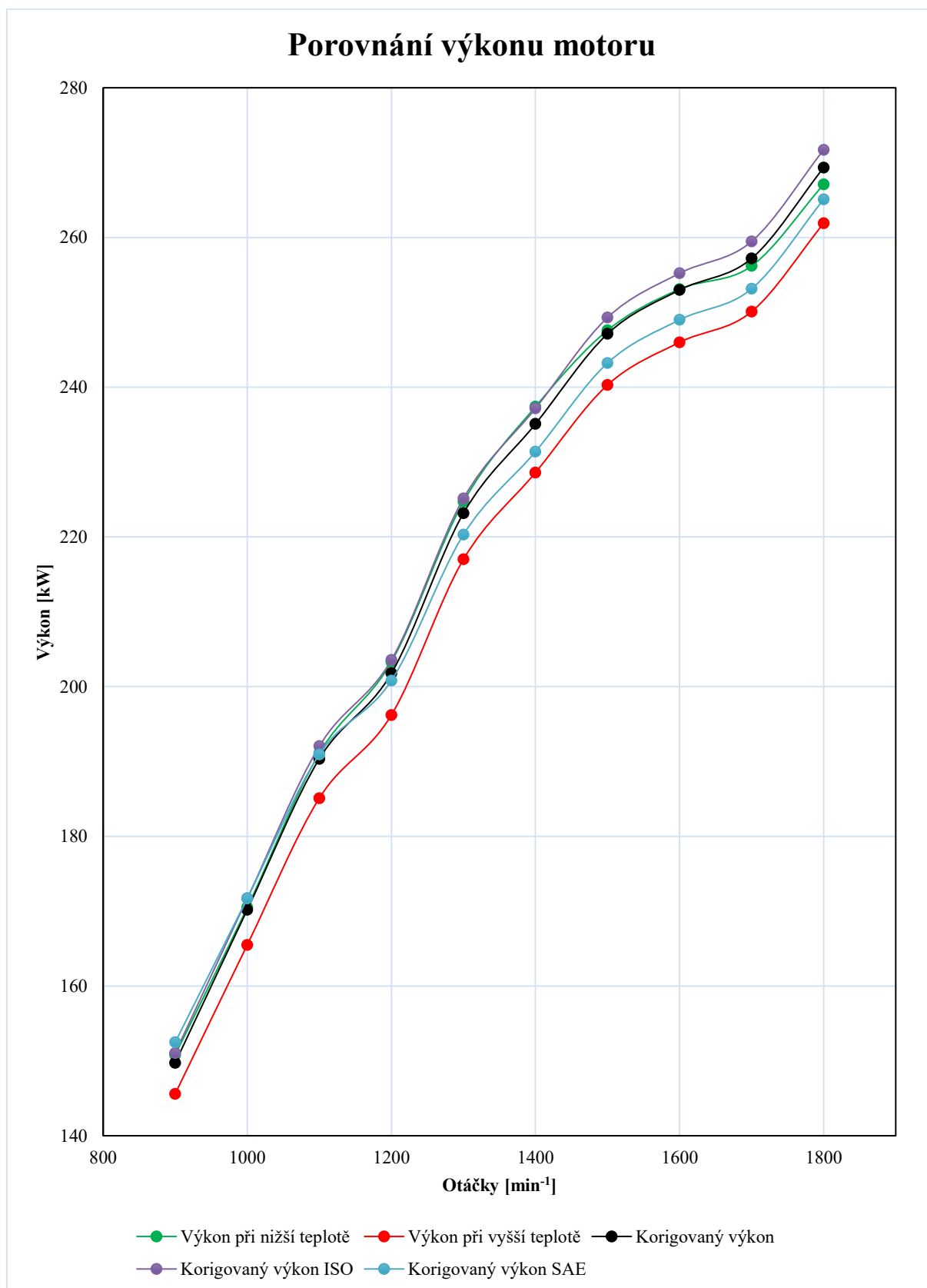
Otáčky motoru [min ⁻¹]	Q [kg.m ⁻³]	R [-]	Poměr Q/R [-]
900	71,134	1,346	52,843
1000	68,607	1,412	48,591
1100	68,082	1,483	45,915
1200	64,869	1,534	42,276
1300	65,099	1,687	38,583
1400	63,096	1,774	35,562
1500	61,194	1,876	32,628
1600	58,469	1,934	30,229
1700	55,953	1,964	28,496
1800	55,846	2,071	26,968

Výsledky výpočtu faktoru motoru F_m , korekčního koeficientu CA a korigovaného výkonu podle normy SAE jsou uvedeny v Tab. 15.

Tab. 15 Korekční koeficient a korigovaný výkon podle normy SAE

Otáčky motoru [min ⁻¹]	F_m [-]	CA [-]	Korigovaný výkon motoru SAE [kW]
900	0,762	1,047	152,485
1000	0,609	1,038	171,725
1100	0,513	1,032	190,948
1200	0,382	1,023	200,797
1300	0,249	1,015	220,301
1400	0,2	1,012	231,389
1500	0,2	1,012	243,232
1600	0,2	1,012	249,001
1700	0,2	1,012	253,151
1800	0,2	1,012	265,095

Grafické znázornění porovnání jednotlivých korigovaných výkonů (Obr. 27)



Obr. 27 Porovnání jednotlivých korigovaných výkonů

Z grafu (Obr. 27) plyne, že korekce výkonu podle normy SAE není v tomto okamžiku vhodná, protože norma počítá s následnou korekcí vlivů paliva (kapitola 4.3.1). Křivka průběhu výkonu je proto v tomto případě nejvíce vzdálená vůči křivce referenční. Oproti tomu norma ISO počítá pouze s vlivy vzduchu na korekci výkonu, a tak je oproti normě SAE blíže k referenční křivce výkonu. Pro přesnější zjištění celkových odchylek je dobré jednotlivé korekce podrobit výpočtu pomocí metody nejmenších čtverců jako v předchozích případech.

Metoda nejmenších čtverců:

ISO:

Za P_{e_ref} se budou dosazovat hodnoty výkonu P_{e_NT} z Tab. 8. Za P_{e_kor} se budou dosazovat hodnoty výkonu P_{ISO} z Tab. 12.

$$MN\check{C}_{ISO} = \sum (P_{e_ref} - P_{e_kor})^2 = 42,196$$

SAE:

Za P_{e_ref} se budou dosazovat hodnoty výkonu P_{e_NT} z Tab. 8. Za P_{e_kor} se budou dosazovat hodnoty výkonu P_{SAE} z Tab. 15.

$$MN\check{C}_{SAE} = \sum (P_{e_ref} - P_{e_kor})^2 = 115,309$$

Hodnota čtverce odchylky pro korigovaný výkon podle rovnice (24) je 18,036. Jedná se tedy o pro daný motor nejpřesnější metodu. Metoda nejmenších čtverců ukázala, že metoda ISO má zhruba dvojnásobnou odchylku oproti metodě podle rovnice (24). Korekce podle normy SAE není v tuto chvíli vhodná, protože počítá s následnou korekcí vlivů paliva. Je proto vhodné ji porovnávat až s výslednou korekcí, zahrnující i vlivy paliva.

4.2.3 SIMULACE VLHKÉHO VZDUCHU

Jelikož se jedná o vozidlo, které je schopné plout na vodě, je logické, že vlhkost nasávaného vzduchu bude vyšší. Všeobecně se vliv vlhkosti pro přeplňované vznětové motory zanedbává. Pokud by ale byla změna vlhkosti velká (např. 90 % a více), dojde již ke zdatelné změně výkonu. Pro simulaci extrémní situace, bude vlhkost nasávaného vzduchu nastavena na 90 %.

První metoda

Pro výpočet se využije opět z rovnice (22), tentokrát pouze bez části s chlazením stlačeného vzduchu. Dostaneme tedy tvar rovnice, uvedený níže. Jelikož rovnice pro výpočet korekčního koeficientu pro přeplňované vznětové motory zanedbává vliv vlhkosti a koeficient a je nula, bude zapotřebí tento koeficient změnit na 1, aby byl vliv vlhkosti započítán. Tlak vodních par totiž roste s rostoucí vlhkostí vzduchu a ubírá tak prostor pro tlak nasávaného vzduchu.

$$K = \left(\frac{p_{b_VT} - a \cdot \varphi_{b_VT} \cdot p_{p_VT}}{p_{b_NT} - a \cdot \varphi_{b_NT} \cdot p_{p_NT}} \right)^m \cdot \left(\frac{T_{b_VT}}{T_{b_NT}} \right)^n$$

Nyní je však potřeba znát také průměrné parciální tlaky par pro nižší a vyšší teplotu. Ty je možné vypočítat podle rovnice (32). [1]

$$\ln p_p'' = 23,58 - \frac{4044,2}{235,6 + t'} \quad (32)$$

Kde:

p_p'' [kPa] - parciální tlak vodní páry,
 t [°C] - teplota vzduchu.

Po úpravě:

$$p_p'' = e^{23,58 - \frac{4044,2}{235,6 + t'}}$$

Po dosazení za t průměrnou nižší teplotu ($t_{b_NT} = 26,24$ °C), tedy teplotu referenční:

$$p_{p_NT}'' = e^{23,58 - \frac{4044,2}{235,6 + 26,24}} = 3,411 \text{ kPa}$$

Po dosazení za t průměrnou vyšší teplotu ($t_{b_VT} = 39,85$ °C):

$$p_{p_VT}'' = e^{23,58 - \frac{4044,2}{235,6 + 39,85}} = 7,316 \text{ kPa}$$

Za φ_{VT} se nyní však dosadí vlhkost = 90 %, pro nasimulování podmínek, které zhruba odpovídají stavu, kdy se vozidlo plaví po vodě. Pro přehlednost nyní φ_{b_90} .

Výsledný korekční koeficient je tedy:

$$K_{\varphi=90} = \left(\frac{p_{b_VT} - a \cdot \varphi_{b_90} \cdot p_{p_VT}}{p_{b_NT} - a \cdot \varphi_{b_90} \cdot p_{p_NT}} \right)^m \cdot \left(\frac{T_{b_VT}}{T_{b_NT}} \right)^n = 0,981$$

Po dosazení koeficientu $K_{\varphi=90}$ do rovnice (23) dostaneme výsledný korigovaný výkon pro případ, kdyby relativní vlhkost nasávaného vzduchu byla 90 %. Výsledky výpočtu jsou znázorněny v Tab. 16.

Tab. 16 Korigovaný výkon při simulaci vysoké relativní vlhkosti vzduchu – 1. metoda

Otáčky motoru [min ⁻¹]	Korigovaný výkon motoru při $\varphi=90\%$ [kW]
900	142,572
1000	162,058
1100	181,25
1200	192,119
1300	212,487
1400	223,845
1500	235,302
1600	240,884
1700	244,898
1800	256,453

Druhá metoda [5]

Vlhkost nasávaného vzduchu lze také vyjádřit, podle tvrzení [5], že nárůst vlhkosti vzduchu o 10 % oproti referenční hodnotě vlhkosti zapříčiní pokles výkonu motoru zhruba o 0,25 % a naopak. V takovém případě je možné jednoduchým výpočtem zjistit, o kolik se změní výkon motoru.

Nejprve je však potřeba vypočítat nárůst vlhkosti oproti původnímu stavu:

$$\varphi_{\text{nárůst}} = \varphi_{b_{90}} - \varphi_{b_{NT}} = 90 \% - 11,6 \% = 78,4 \%$$

Pokud nárůst vlhkosti o každých 10 % způsobí pokles výkonu o 0,25 %, pak nárůst vlhkosti o 78,4 % způsobí pokles výkonu o (vypočteno trojčlenkou) 1,96 %.

Výsledný výkon je dán následujícím vztahem a je zobrazen v Tab. 17:

$$P_{\text{výsledný}} = P_{\text{kor}} - P_{\text{kor}} \cdot 0,0196$$

Tab. 17 Korigovaný výkon při simulaci vysoké relativní vlhkosti vzduchu – 2. metoda

Otáčky motoru	Korigovaný výkon motoru při $\varphi=90\%$ -druhá metoda
[min ⁻¹]	[kW]
900	146,802
1000	166,866
1100	186,628
1200	197,819
1300	218,791
1400	230,487
1500	242,283
1600	248,03
1700	252,164
1800	264,062

V Tab. 18 jsou pak zobrazeny obě metody v porovnání s korigovaným výkonem včetně jejich rozdílů. Velikosti rozdílů jednotlivých metod se liší více než dvojnásobně. Nelze tedy brát jejich výsledky jako relevantní. Pro přesné zjištění vlivu vlhkosti vzduchu na výkon motoru by bylo zapotřebí provést experimentální měření se simulacemi změn vlhkosti vzduchu a sledovat jejich vliv na výkon motoru.

Tab. 18 Tabulka porovnání výsledků změny výkonu při vysoké vlhkosti

Otáčky motoru	Korigovaný výkon	Výkon - 1. metoda	Rozdíl	Výkon - 2. metoda	Rozdíl
[min ⁻¹]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]
900	149,737	142,572	7,165	146,802	2,935
1000	170,202	162,058	8,144	166,866	3,336
1100	190,359	181,25	9,109	186,628	3,731
1200	201,774	192,119	9,655	197,819	3,955
1300	223,165	212,487	10,678	218,791	4,374
1400	235,095	223,845	11,25	230,487	4,608
1500	247,127	235,302	11,825	242,283	4,844
1600	252,989	240,884	12,105	248,03	4,959
1700	257,205	244,898	12,307	252,164	5,041
1800	269,341	256,453	12,888	264,062	5,279

4.3 KOREKCE VLIVŮ PALIVA

4.3.1 KOREKCE PODLE NORMY SAE J1349: [11]

$$CF = F_d \cdot F_v, \quad (33)$$

Kde:

CF	[-]	- korekční koeficient vlastností paliva podle SAE,
F_d	[-]	- koeficient závislosti na hustotě paliva,
F_v	[-]	- koeficient závislosti na viskozitě paliva.

Závislost hustoty nafty na teplotě paliva: [13]

S rostoucí teplotou klesá hustota nafty. Tato závislost se dá vyjádřit pomocí rovnice (34):

$$\rho_{pal} = 844 - 0,676 \cdot t, \quad (34)$$

Kde:

t	[°C]	- teplota paliva.
-----	------	-------------------

Hustota paliva při nižší (referenční) teplotě ($t = 27,14$ °C) je:

$$\rho_{pal_{NT}} = 844 - 0,676 \cdot 27,14 = 825,653 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Hustota paliva při vyšší teplotě ($t = 36,65$ °C) je:

$$\rho_{pal_{VT}} = 844 - 0,676 \cdot 36,65 = 819,225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Koeficient závislosti na hustotě paliva: [11]

$$F_d = 1 + 0,7 \cdot \left(\frac{850 - \rho_{pal}}{\rho_{pal}} \right), \quad (35)$$

Kde:

ρ_{pal}	[kg·m ⁻³]	- hustota paliva
--------------	-----------------------	------------------

$$F_d = 1 + 0,7 \cdot \left(\frac{850 - \rho_{pal_{VT}}}{\rho_{pal_{VT}}} \right) = 1 + 0,7 \cdot \left(\frac{850 - 819,225}{819,225} \right) = 1,026$$

Koeficient závislosti na hustotě paliva: [11]

$$F_v = \frac{1 + \frac{S}{v}}{1 + \frac{S}{2,6}}, \quad (36)$$

Kde:

S	[-]	- koeficient citlivosti viskozity
v	[m ² ·s ⁻¹]	- kinematická viskozita paliva

$$F_v = \frac{1 + \frac{S}{v}}{1 + \frac{S}{2,6}} = \frac{1 + \frac{0,15}{3}}{1 + \frac{0,15}{2,6}} = 0,993$$

Výsledný korekční koeficient vlastností paliva podle SAE je:

$$CF = F_d \cdot F_v = 1,026 \cdot 0,993 = 1,019$$

4.3.2 KOREKCE PODLE PRINCIPU FUNKCE VSTŘIKOVACÍHO ČERPADLA PALIVA

Následující výpočtová část je založena na předpokladu, že vliv hustoty nafty na výkon motoru vyplývá z faktu, že vstřikovací čerpadlo pracuje objemově, a tedy i množství vstříknutého paliva roste s jeho měrnou hmotností.

Efektivní účinnost

Pomocí efektivní účinnosti je možné určit, o kolik by se měla zvýšit dávka paliva, aby bylo možné dosáhnout stejného výkonu jako referenčního, při snížené hustotě paliva.

Tab. 19 Efektivní účinnost

Otáčky motoru [min ⁻¹]	Efektivní účinnost při nižší teplotě [-]	Efektivní účinnost při vyšší teplotě [-]
900	0,346	0,339
1000	0,367	0,36
1100	0,377	0,37
1200	0,384	0,377
1300	0,391	0,388
1400	0,396	0,391
1500	0,399	0,394
1600	0,399	0,393
1700	0,397	0,391
1800	0,392	0,389

Průměrná efektivní účinnost při nižší teplotě (referenční): $\eta_{e(ref)} = 0,385$

Průměrná efektivní účinnost při vyšší teplotě: $\eta_{e(VT)} = 0,379$

Hmotnostní spotřeba paliva:

$$m_p = m_{pe} \cdot P_e, \quad (37)$$

Kde:

m_{pe}	[g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹]	- měrná efektivní spotřeba
P_e	[kW]	- efektivní výkon

Tab. 20 Hodinová hmotnostní spotřeba paliva

Otáčky motoru	m_p – nižší teplota	m_p – vyšší teplota
[min ⁻¹]	[kg·h ⁻¹]	[kg·h ⁻¹]
900	36,825	36,313
1000	39,3	38,859
1100	42,864	42,258
1200	44,706	43,988
1300	48,535	47,306
1400	50,709	49,355
1500	52,442	51,568
1600	53,657	52,939
1700	54,468	54,022
1800	57,64	56,858

Objemová spotřeba paliva:

Pokud známe hmotnostní spotřebu paliva, je možné na základě známé hustoty nafty vypočítat, jaká bude objemová spotřeba paliva. Nyní však stačí vypočítat pouze referenční objemovou spotřebu paliva.

$$V_p = \frac{m_p}{\rho_{MN}}, \quad (38)$$

Kde:

m_p	[kg·h ⁻¹]	- hmotnostní spotřeba paliva
ρ_{MN}	[kg·m ⁻³]	- hustota motorové nafty

Tab. 21 Objemová spotřeba paliva při nižší teplotě

Otáčky motoru	V_p – nižší teplota
[min ⁻¹]	[l·h ⁻¹]
900	44,601
1000	47,599
1100	51,915
1200	54,146
1300	58,784
1400	61,416
1500	63,515
1600	64,988
1700	65,97
1800	69,812

Po zjištění objemové spotřeby paliva je možné zjistit, jak by se změnila hmotnostní spotřeba paliva, pokud by se místo nafty o nižší teplotě použila nafta o teplotě vyšší. Za ρ_{MN} se nyní dosadí hustota motorové nafty při vyšší teplotě, ale objemová spotřeba zůstane stejná, tedy referenční. Výsledky jsou zobrazeny v Tab. 22.

Tab. 22 Hmotnostní spotřeba pro naftu o vyšší teplotě a referenční objemové spotřebě

Otáčky motoru	m_p – přepočtená
[min ⁻¹]	[kg.h ⁻¹]
900	36,539
1000	38,994
1100	42,53
1200	44,358
1300	48,157
1400	50,314
1500	52,033
1600	53,239
1700	54,044
1800	57,191

Přepočítaný výkon, který by byl při této hmotnostní spotřebě a referenční efektivní účinnosti je vypočítán podle následujícího vzorce:

$$P_{\text{přepočet}} = m_p \cdot \eta_{e_NT} \cdot Hu$$

Tab. 23 Vypočítaný výkon

Otáčky motoru	$P_{\text{přepočet}}$
[min ⁻¹]	[kW]
900	149,626
1000	169,172
1100	189,612
1200	201,717
1300	222,95
1400	235,552
1500	245,672
1600	251,129
1700	254,205
1800	265,02

Výsledná korekce paliva je pak dána podílem referenční a vypočítané hodnoty výkonu. Korekční koeficient pak dorovnáva rozdíl, mezi jednotlivými výkony.

$$k_{\text{pal}} = \frac{P_{\text{ref}}}{P_{\text{přepočet}}} = 1,011$$

4.4 SOUČASNÁ KOREKCE PALIVA I VZDUCHU

4.4.1 KOREKCE VZDUCHU I PALIVA PODLE SAE [11]

Na základě výpočtů v kapitolách 4.2.2 a 4.3.1 byly určeny korekční koeficienty CA a CF . Nyní je možné vypočítat celkový korigovaný výkon podle normy SAE J1349 pomocí rovnice (39).

$$P_{kor_SAE} = P_{e_VT} \cdot CA \cdot CF, \quad (39)$$

Celkový korigovaný výkon podle SAE je v Tab. 24.

Tab. 24 Celkový korigovaný výkon podle SAE

Otáčky motoru	Celkový korigovaný výkon SAE
[min ⁻¹]	[kW]
900	155,356
1000	174,959
1100	194,544
1200	204,579
1300	224,45
1400	235,746
1500	247,812
1600	253,69
1700	257,919
1800	270,087

4.4.2 KOREKCE VZDUCHU PODLE VÝPOČTU, PALIVA PODLE SAE

Pro vyjádření korekce jak vlivů nasávaného vzduchu, tak paliva je potřeba upravit základní vzorec, využitý v kapitole 4.2 pro nalezení korekčního koeficientu na atmosférické podmínky. Konkrétněji se jedná o nalezení nového koeficientu v exponentu n . Při hledání tohoto koeficientu je však potřeba už započítat korekci paliva. Korekce paliva je již zjištěna v kapitole 4.3 podle normy SAE – známe korekční koeficient CF ($CF = 1,019$).

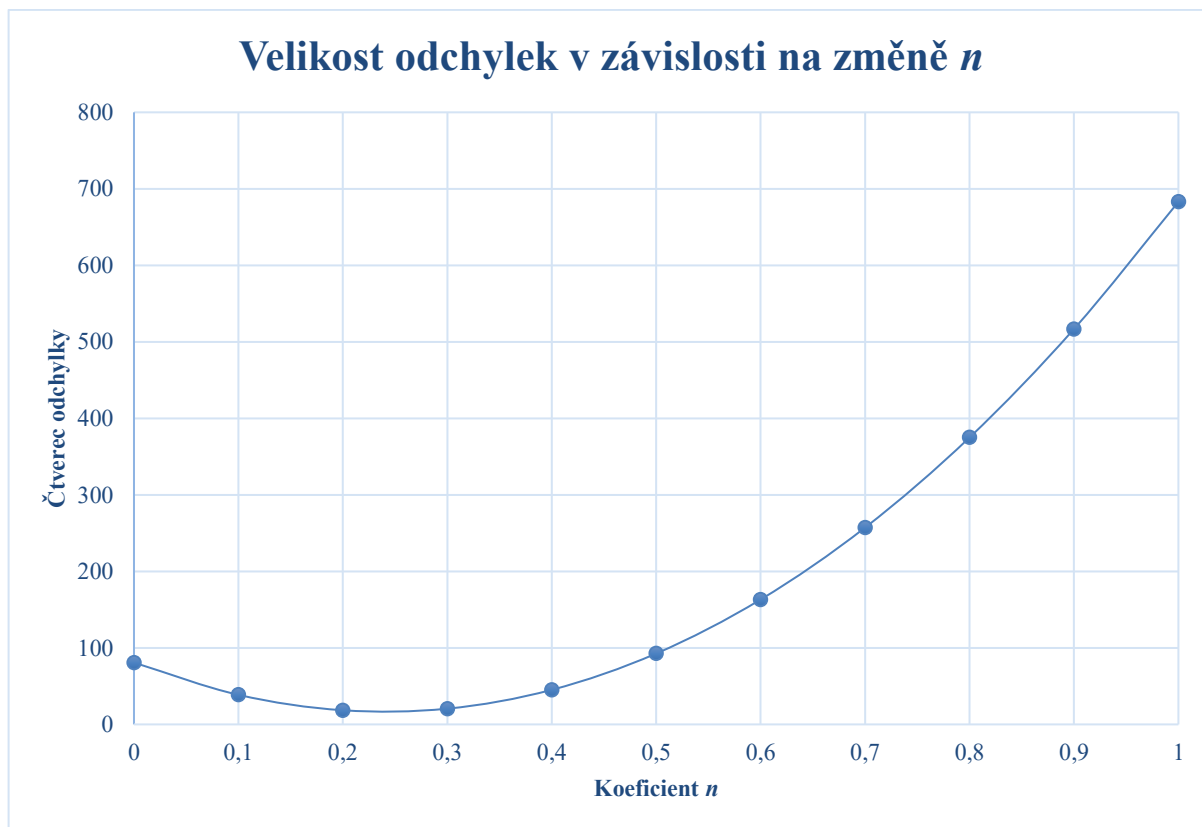
Výsledný vzorec má tedy tvar:

$$P_e = P_{e_{VT}} \cdot CF \cdot \left[K - 0,7 \cdot (1 - K) \cdot \left(\frac{1}{\eta_m} - 1 \right) \right], \quad (40)$$

Pomocí metody nejmenších čtverců bylo zjištěno (v programu Mathcad), že nejmenší suma čtverců odchylek je při použití $n = 0,2$ viz Tab. 25. Na Obr. 28 je pak znázorněný celý průběh velikosti odchylek v závislosti na změně n .

Tab. 25 Závislost velikosti odchylky na koeficientu n se zohledněním vlivu paliva

Koeficient n	Čtverec odchylky
0	80,755
0,1	38,662
0,2	18,513
0,3	20,6
0,4	45,218
0,5	92,665
0,6	163,243
0,7	257,255
0,8	375,009
0,9	516,816
1	682,989



Obr. 28 Závislost velikosti odchylek na koeficientu n se zohledněním vlivu paliva

Po dosažení do rovnice pro výpočet korekčního koeficientu K známe výslednou hodnotu:

$$K = \left(\frac{p_{b_{VT}}}{p_{b_{NT}}}\right)^m \cdot \left(\frac{T_{b_{VT}}}{T_{b_{NT}}}\right)^n = \left(\frac{98,75}{98,8}\right)^{0,7} \cdot \left(\frac{313}{299,39}\right)^{0,2} = 1,009$$

Celkový korigovaný výkon se pak vypočítá dosazením do rovnice (38). Tab. 26 obsahuje výsledky výpočtu v závislosti na otáčkách motoru.

Tab. 26 Celkový korigovaný výkon

Otáčky motoru	P_{kor_celk}
[min^{-1}]	[kW]
900	149,724
1000	170,188
1100	190,343
1200	201,757
1300	223,147
1400	235,075
1500	247,106
1600	252,968
1700	257,184
1800	269,318

4.4.3 KOREKCE VZDUCHU I PALIVA PODLE VÝPOČTU

Stejně jako v předchozím případě je pro vyjádření korekce jak vlivů nasávaného vzduchu, tak paliva upravit základní vzorec, využitý v kapitole 4.2 pro nalezení korekčního koeficientu na atmosférické podmínky. Opět je potřeba započítat korekci paliva. Tentokrát se však jako korekční koeficient bere hodnota k_{pal} , vypočtená v kapitole 4.3.2. ($k_{pal} = 1,008$)

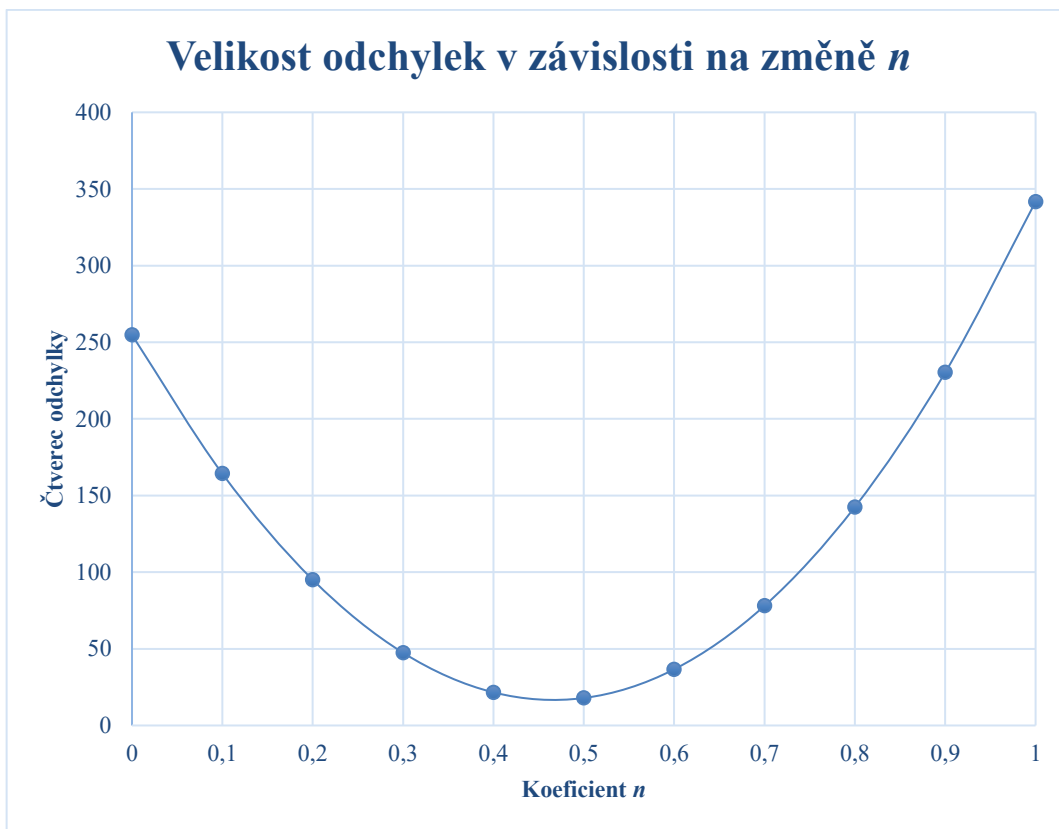
Výsledný vzorec má tedy tvar:

$$P_{kor} = P_{e_{VT}} \cdot k_{pal} \cdot \left[K - 0,7 \cdot (1 - K) \cdot \left(\frac{1}{\eta_m} - 1 \right) \right], \quad (41)$$

Pomocí metody nejmenších čtverců bylo zjištěno (v programu Mathcad), že nejmenší suma čtverců odchylek je při použití $n = 0,5$ viz Tab. 27. Na Obr. 29 je pak znázorněný celý průběh velikosti odchylek v závislosti na změně n .

Tab. 27 Závislost velikosti odchylky na koeficientu n se zohledněním vlivu paliva

Koeficient n	Čtverec odchylky
0	254,774
0,1	164,279
0,2	95,076
0,3	47,421
0,4	21,601
0,5	17,908
0,6	36,635
0,7	78,08
0,8	142,541
0,9	230,322
1	341,73



Obr. 29 Závislost velikosti odchylek na koeficientu n se zohledněním vlivu paliva

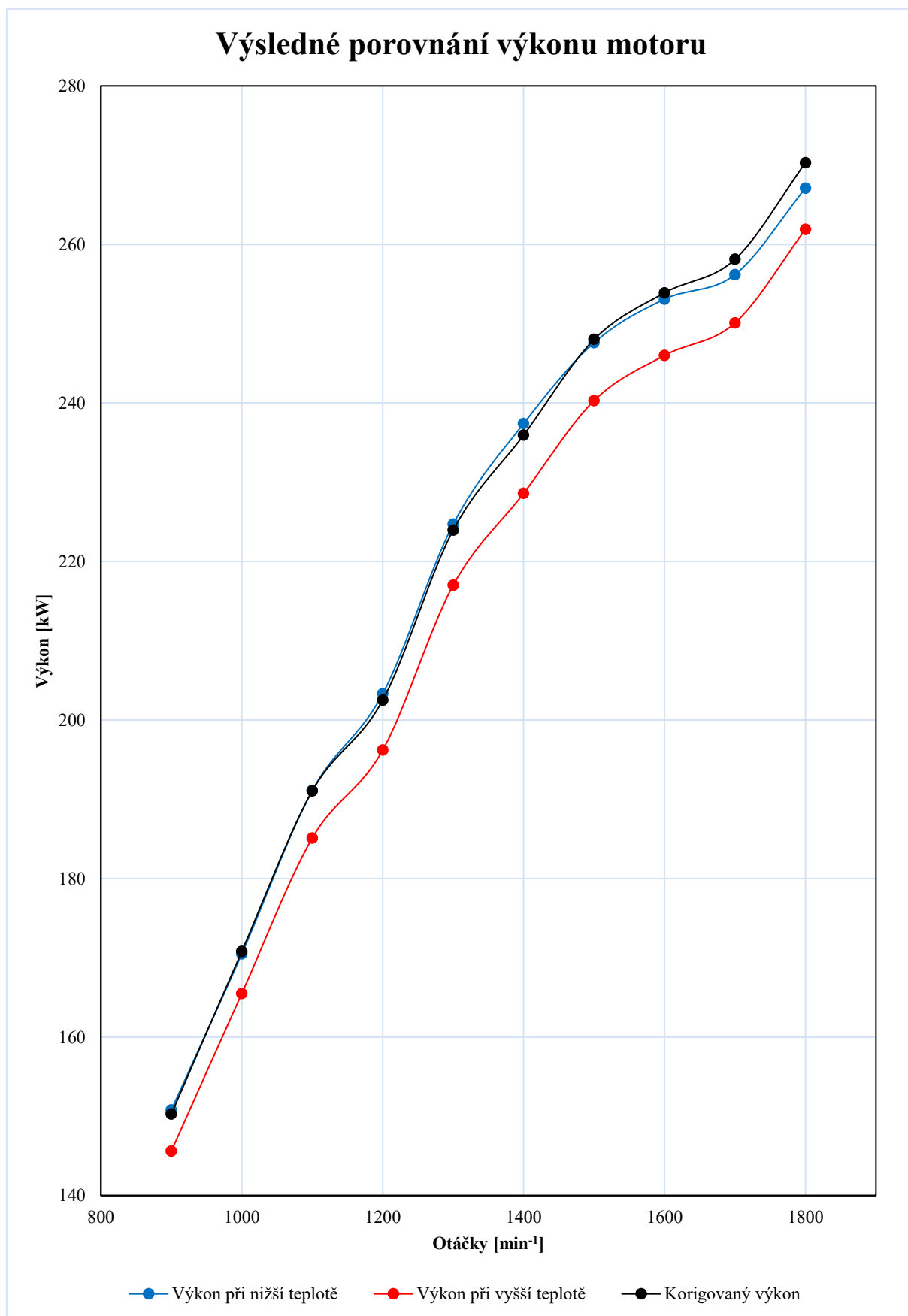
Po dosazení do rovnice pro výpočet korekčního koeficientu K známe výslednou hodnotu:

$$K = \left(\frac{p_{b_VT}}{p_{b_NT}}\right)^m \cdot \left(\frac{T_{b_VT}}{T_{b_NT}}\right)^n = \left(\frac{98,75}{98,8}\right)^{0,7} \cdot \left(\frac{313}{299,39}\right)^{0,5} = 1,022$$

Celkový korigovaný výkon se pak vypočítá dosazením do rovnice (41). Tab. 28 obsahuje výsledky výpočtu v závislosti na otáčkách motoru.

Tab. 28 Celkový korigovaný výkon

Otáčky motoru	P_{kor}
[min ⁻¹]	[kW]
900	150,274
1000	170,813
1100	191,042
1200	202,499
1300	223,967
1400	235,939
1500	248,015
1600	253,898
1700	258,129
1800	270,308



Obr. 30 Graf výsledného porovnání výkonů

Tab. 29 Porovnání výsledných korekcí výkonů

Otáčky motoru	Referenční výkon	Vzduch i palivo - SAE	Vzduch - výpočet, palivo - SAE	Vzduch i palivo - výpočet
[min-1]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]
900	150,8	155,356	149,724	150,274
1000	170,5	174,959	170,188	170,813
1100	191,1	194,544	190,343	191,042
1200	203,3	204,579	201,757	202,499
1300	224,7	224,45	223,147	223,967
1400	237,4	235,746	235,075	235,939
1500	247,6	247,812	247,106	248,015
1600	253,1	253,69	252,968	253,898
1700	256,2	257,919	257,184	258,129
1800	267,1	270,087	269,318	270,308

Odchylky výpočtů

Odchylky jednotlivých výpočtů je možné určit pomocí metody nejmenších čtverců:

Vzduchu i palivo – SAE:

$$MNČ = \sum (P_{e_ref} - P_{e_kor})^2 = 69,206$$

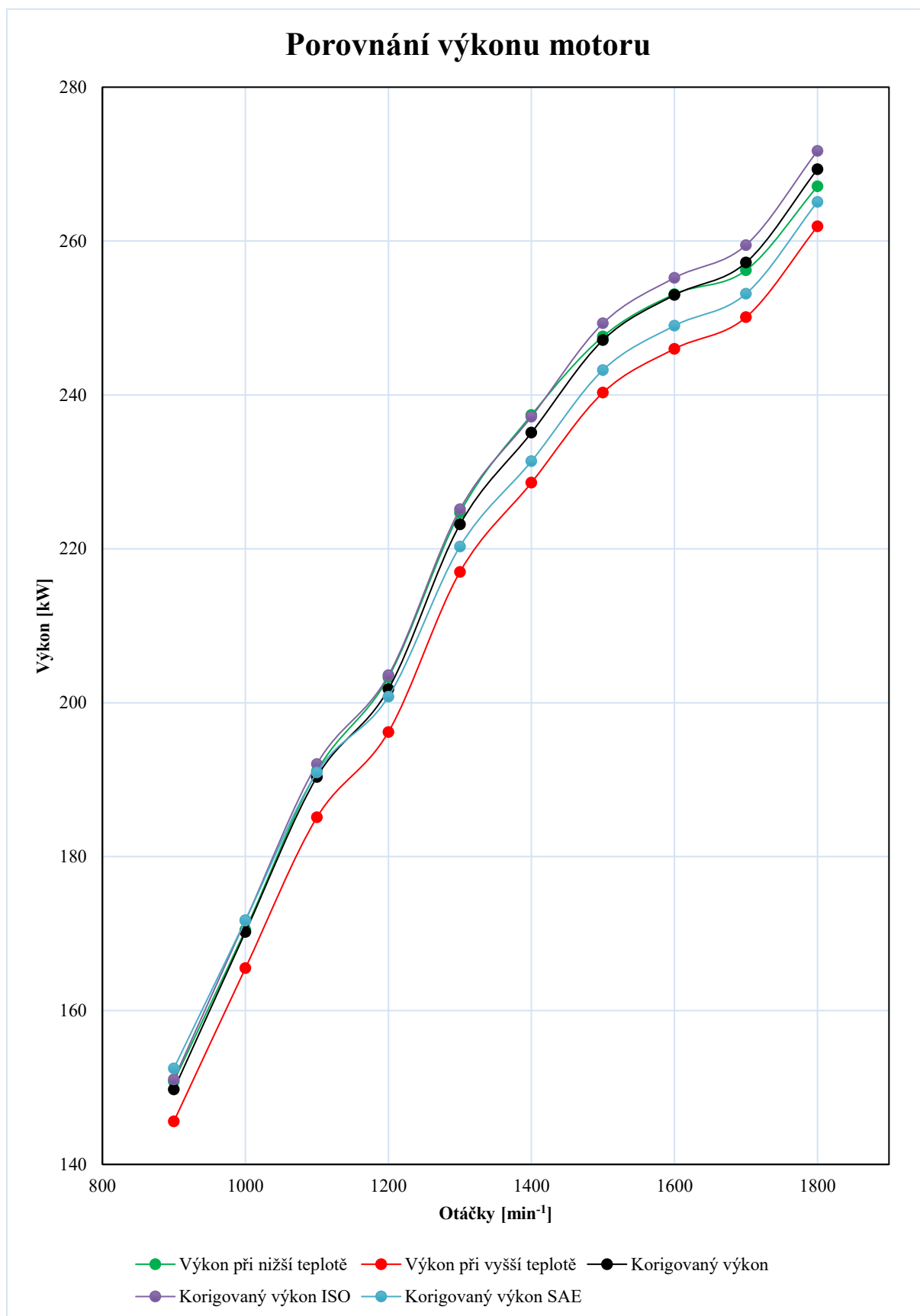
Vzduch – výpočet, palivo SAE:

$$MNČ = \sum (P_{e_ref} - P_{e_kor})^2 = 18,177$$

Vzduch i palivo – výpočet:

$$MNČ = \sum (P_{e_ref} - P_{e_kor})^2 = 18,514$$

Metodou nejmenších čtverců bylo zjištěno, že nejvíce přesná byla poslední metoda výpočtu.



Obr. 31 Celkové porovnání korigovaných výkonů

Přepočet na korigovaný moment:

Po vypočítání korigovaného výkonu motoru je možné vypočítat také korigovaný moment motoru pomocí rovnice (42).

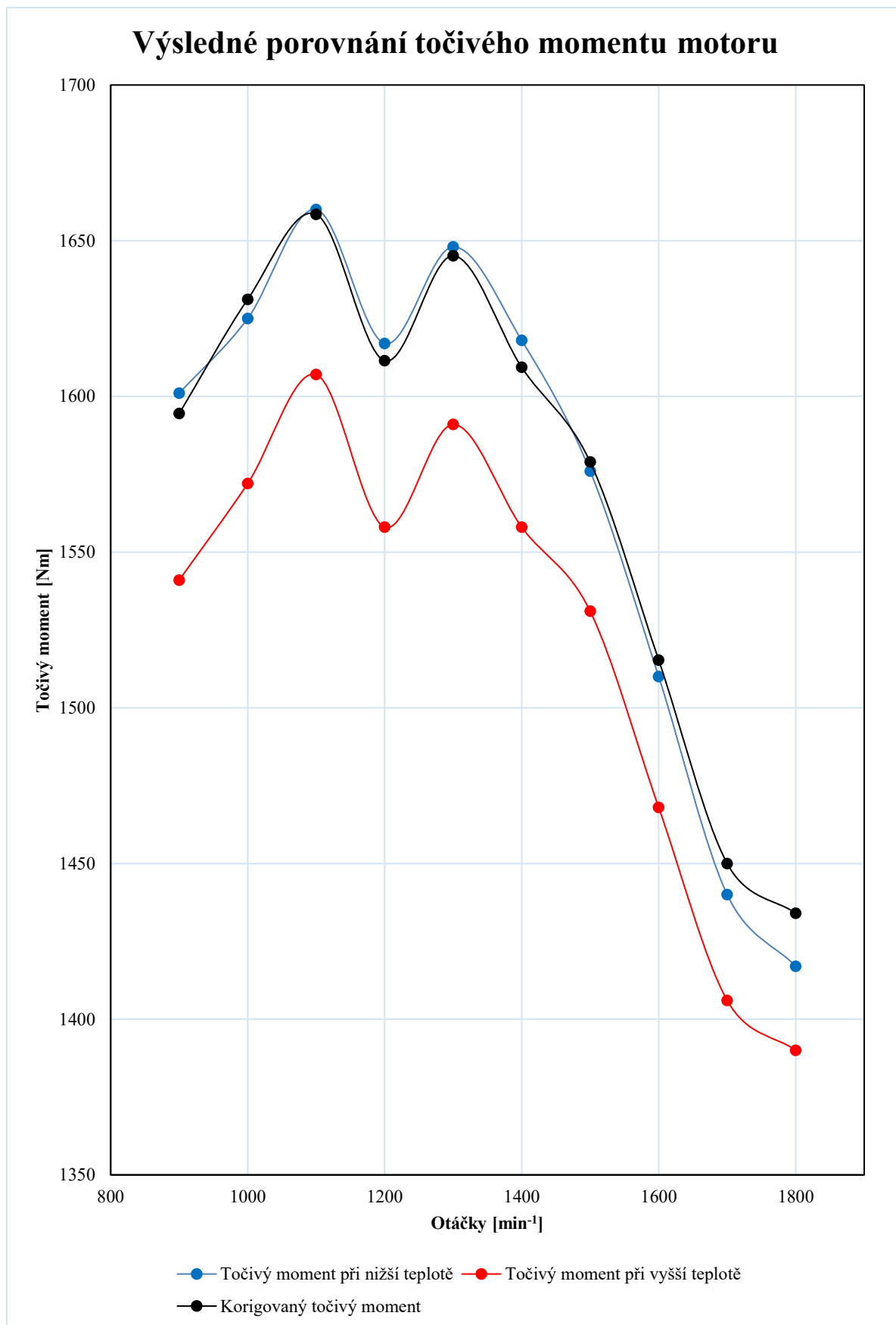
$$M_{t_kor} = \frac{P_{kor}}{2 \cdot \pi \cdot n_m}, \quad (42)$$

Kde:

P_{kor} [kW] - korigovaný výkon,
 n_m [min⁻¹] - otáčky motoru,

Tab. 30 Celkový korigovaný moment

Otáčky motoru	M_{t_kor}
[min ⁻¹]	[kW]
900	1594,46
1000	1631,15
1100	1658,47
1200	1611,43
1300	1645,17
1400	1609,32
1500	1578,91
1600	1515,34
1700	1449,97
1800	1434,03



Obr. 32 Graf výsledného porovnání točivých momentů

4.5 VÝKON PŘI JINÝCH PODMÍNKÁCH MĚŘENÍ

Zjištění, jaký výkon bude motor mít v jiných, než dosud měřených podmínkách (jiná teplota, tlak vzduchu atd.) se dá zjistit pomocí zpětného dosazování do výše uvedených vzorců.

4.5.1 STEJNÉ REFERENČNÍ HODNOTY

Pokud by zjišťování výkonu probíhalo při stejných referenčních podmínkách, jako jsou v této práci, bylo by zjištění výkonu následující.

$$P_{ref} = P \cdot k_{pal} \cdot k_{vzd}, \quad (43)$$

Kde:

P_{ref}	[kW]	- referenční výkon použitý v této práci
P	[kW]	- hledaný výkon
k_{pal}	[-]	- korekční koeficient paliva ($k_{pal} = 1,008$)
k_{vzd}	[-]	- korekční koeficient vzduchu

Korekční koeficient vlivů paliva by zůstal stejný 1,008. Korekční koeficient vlivů vzduchu by se vypočítal pomocí následujících vzorců:

$$K = \left(\frac{p_{b,zvolené}}{98,8} \right)^{0,7} \cdot \left(\frac{T_{b,zvolené}}{299,39} \right)^{0,5}, \quad (44)$$

$$k_{vzd} = K - 0,7 \cdot (1 - K) \cdot \left(\frac{1}{0,9} - 1 \right), \quad (45)$$

Vyjádřením neznámé P získáme hledaný výkon.

$$P = \frac{P_{ref}}{k_{pal} \cdot k_{vzd}}, \quad (46)$$

4.5.2 ODLIŠNÉ REFERENČNÍ HODNOTY

Pokud by byly zvolené jiné referenční hodnoty, než jsou uvedeny v této práci, byl by výpočet o něco složitější. Korekční koeficient paliva k_{pal} by se musel vypočítat znovu s použitím nových referenčních hodnoty. Výpočet korekčního koeficientu vzduchu k_{vzd} by probíhal stejně, pouze by se za referenční hodnoty zvolily jiné, tedy nové referenční hodnoty.

Výpočet korekčního koeficientu k_{pal} při jiných referenčních podmínkách se vypočítá podle následujícího postupu:

Výpočet referenční efektivní účinnosti a následné zprůměrování:

$$\eta_{e,ref} = \frac{1}{m_{pe,ref} \cdot Hu_{ref}}, \quad (47)$$

Hmotnostní spotřeba paliva:

$$m_{p,ref} = m_{pe,ref} \cdot P_{ref}, \quad (48)$$

Zjištění odpovídající hustoty nafty v závislosti na její teplotě (hustota jako funkce teploty):

$$\rho_{pal}(t_{vz}) = 844 - 0,676 \cdot t_{vz} \quad (49)$$

Kde:

t_{vz} [°C] - teplota okolního vzduchu

Objemová spotřeba paliva:

$$V_{pal,ref} = \frac{m_{p,ref}}{\rho_{pal}(ref)}, \quad (50)$$

Přepočítaná hmotnostní spotřeba paliva s hustotou paliva, vypočtenou pro zvolenou teplotu vzduchu:

$$m_{p,přep} = V_{pal,ref} \cdot \rho_{pal}(zvolené), \quad (51)$$

Přepočítaný výkon:

$$P_{přep} = m_{p,přep} \cdot \eta_{e,ref} \cdot Hu_{ref}, \quad (52)$$

Výsledný korekční koeficient paliva:

$$k_{pal} = \frac{P_{ref}}{P_{přep}}, \quad (53)$$

ZÁVĚR

Tato diplomová práce pojednávala o problematice korigování výkonových parametrů přeplňovaného, vznětového motoru, v závislosti na změně vlastností nasávaného vzduchu a použitého paliva (motorové nafty). Dále se také zabývá, jaký konkrétní vliv mají tyto změny na výkon motoru.

Vliv teploty a tlaku vzduchu na výkon je patrný zejména díky jeho provázanosti s hustotou vzduchu. Ta ovlivňuje množství kyslíku, dopraveného do spalovacího prostoru, který spolu s palivem tvoří spalovací směs motoru. S narůstající teplotou hustota, a tedy i obsah kyslíku ve směsi, klesá. Stejně tak klesá při zvyšování tlaku. Jeho závislost na nadmořské výšce by se dala zjednodušeně vyjádřit tak, že při nárůstu nadmořské výšky o 500 m dojde ke snížení tlaku zhruba o 5 kPa, což je cca 5 %. Nad 3500 m.n.m. začíná být pokles tlaku pozvolnější. Vlhkost vzduchu má proti teplotě a tlaku menší vliv na výkon motoru. Při vyšší teplotě se její účinek sice projevuje výrazněji, naopak při nižší teplotě (zhruba pod 10 °C) je její vliv opravdu minimální. Výhoda určitého procenta vody ve spalovacím prostoru je chladicí účinek a také snížení množství produktů nedokonalého spalování.

Výkon motoru také značně ovlivňují vlastnosti použitého paliva. Například jeho teplota. Ta má vliv na hustotu paliva. Pro představu, podle normy GOST P 8.610-2004, při teplotě paliva kolem 25 °C zapříčiní nárůst teploty o 1 °C pokles hustoty o 0,68 kg·m⁻³. Hustota má potom vliv na hmotnostní množství paliva, dopraveného do spalovacího prostoru. Odměřování dávky paliva vstřikovacím čerpadlem paliva pracuje na objemovém principu. Určuje tedy dávku paliva podle objemu, nikoliv jeho hmotnosti. S nižší hustotou paliva dochází při stejném objemu k poklesu hmotnostního množství paliva, a tak dochází ke snížení výkonu. Dalším parametrem motorové nafty je cetanové číslo, které udává schopnost samovznícení. S rostoucím cetanovým číslem tato schopnost roste a zkracuje se tak délka okamžiku zpoždění zážehu. Čím vyšší je cetanové číslo, tím je spalování dokonalejší a pravidelnější. Naopak palivo s nižším cetanovým číslem má však zpravidla větší hustotu (energie uvolněná spálením 1 kg paliva), a tedy větší objemovou výhřevnost. Další parametry paliva, které mají vliv na výkon jsou: viskozita, obsah síry, bod vzplanutí, karbonizační zbytek, obsah vody, obsah mechanických nečistot, oxidační stálost, mazivost.

Vlivy změn vlastností paliva na výkon se v praxi prokázaly při měření na zkušebním motorovém stanovišti, popisovaném v této práci. Při použití stejného motoru (PV6-K37), ve stejný den, došlo při měření vnější otáčkové charakteristiky k poklesu výkonu o 6 % při rozdílných atmosférických podmínkách. Atmosférické podmínky při prvním, referenčním měření byly v průměru následující: teplota vzduchu 26,2 °C, barometrický tlak 98,8 kPa a průměrná relativní vlhkost 11,6 %. Pro částečné nasimulování klimatických podmínek, panujících v zemi, kam se motor vyváží, byla zvýšena teplota vzduchu na 39,6 °C. Barometrický tlak v průběhu druhého měření byl 98,75 kPa a relativní vlhkost 7,2 %. Po naměření potřebných hodnot byla provedena korekce. Mimo jiné bylo na zkušebním motorovém stanovišti provedeno také měření zátěžové charakteristiky a charakteristiky se změnou otevření palivové přípusti. Obě tato měření bylo prováděna při nižší i vyšší teplotě, jako tomu bylo při měření vnější otáčkové charakteristiky.

Korekce výkonu se provádí proto, aby bylo možné jednotlivá měření motoru (právě při odlišných atmosférických podmínkách a vlastnostech paliva) porovnávat a měly nějakou vypovídající hodnotu. Tyto korekce je možné provádět podle několika normalizačních institucí které mají definované metody pro odhad výkonu motoru mimo referenčních podmínek. Některé

normy však počítají pouze s korekcí na atmosférické podmínky. V této práci byla nejprve provedena korekce, která uvažovala pouze vliv vzduchu na výkon. Tato metoda využívala přizpůsobení korekčního vzorce tak, aby se průběh výsledného korigovaného výkonu co nejvíce blížil průběhu výkonu referenčnímu. Tím je tato metoda nejpřesnější oproti ostatním normalizovaným metodám, se kterými byla v této práci porovnávána. Porovnání proběhlo s normou ISO DIN 1585, kde byla odchylka od hodnot referenčních dvojnásobná oproti metodě s upravovaným korekčním vzorcem. Druhá porovnávaná norma byla SAE J1349, která však počítá s následnou korekcí vlivů paliva, proto není příliš vhodná pro samotnou korekci vlivů vzduchu. Odchylka zde byla desetinásobná.

Korekce vlivů paliva byla prováděna v prvním případě podle normy SAE, která počítá se změnou hustoty v závislosti na teplotě nafty a změnou viskozity. Ta však nebyla na zkušebním motorovém stanovišti měřena, a tak se vycházelo z normalizovaných hodnot motorové nafty, které jsou 2 až $4,5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. V této práci byla zvolena hodnota $3 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Ve druhém případě se vycházelo z funkce vstřikovacího čerpadla a jeho objemového způsobu práce. Tato metoda je přesnější než metoda SAE, protože se vycházelo přímo z hodnot, naměřených na zkoušeném motoru. Pro úplnou korekci se zahrnutím i vlivů vzduchu bylo však potřeba přepočítat znovu korekční koeficient vzduchu. Ten musí být takový, při kterém spolu s korekčním koeficientem paliva dojde k nejlepšímu splynutí referenční a korigované křivky výkonu. Podle normy SAE nabývá korekční koeficient vzduchu hodnot 1,012 až 1,047. Korekční koeficient paliva 1,019. Oproti tomu druhá metoda má výsledný koeficient vzduchu 1,024 a paliva 1,008. Je zde mezi nimi větší rozdíl a větší vliv vzduchu než paliva. Posledním způsobem provedení celkové korekce byla kombinace těchto dvou metod. Tedy použití korekce paliva podle SAE a následné dopočítání korekce vzduchu. V takovém případě byla hodnota korekčního koeficientu vzduchu 1,009. Velikosti odchylek jednotlivých metod byly porovnávány pomocí metody nejmenších čtverců.

Nejpřesnější byla metoda výpočtu korekčního koeficientu paliva podle funkce vstřikovacího čerpadla a následného přepočtu vzorce pro výpočet korekčního koeficientu vzduchu. Odchylka výkonu od referenčních hodnot byla v průměru pouze 0,44 %. Metoda s druhou nejmenší odchylkou byla kombinovaná metoda SAE a přepočtu. Její odchylka sice byla jen 0,52 %, nicméně díky tomu, že nebyla známá přesná hodnota viskozity nafty, tak se jedná o metodu méně vhodnou. Odchylka výkonu podle normy SAE byla zhruba 1,1 %. Ze stejného důvodu, jako v předchozím případě ale zůstává nejvhodnější metoda prvního výpočtu.

Ke konci práce byla vytvořena metodika k určování toho, jak změny vlastností paliva a vzduchu ovlivní výkon motoru. Bylo zde počítáno se zachováním referenčních hodnot při opětovném použití tohoto motoru ale také s vytvořením nových referenčních hodnot.

Pro úplné zpřesnění výpočtů, prováděných v této práci by bylo zapotřebí provést sérii více měření na motorovém zkušebním stanovišti s více motory stejného typu a provést také více simulací změn například teploty vzduchu, paliva a dalších.

Tato práce může sloužit jako předloha pro vytvoření korekčních metodik i pro další typy spalovacích motorů.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] ÇENGEL, Yunus A. a Michael A. BOLES. *Thermodynamics: an engineering approach*. Eighth edition. New York: McGraw-Hill Education, 2015. ISBN 978-0-07-339817-4.
- [2] FERGUSON, Colin R. a Allan KIRKPATRICK. *Internal combustion engines: applied thermosciences*. Third edition. Chichester, West Sussex, United Kingdom, 2016. ISBN 978-1-118-53331-4.
- [3] CATON, J. A. *An introduction to thermodynamic cycle simulations for internal combustion engines*. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, United Kingdom, 2016. ISBN 978-111-9037-569.
- [4] MINISTERSTVO NÁRODNÍ OBRANY. *Obrněný transportér OT-62: Popis a provoz*. Praha, 1968.
- [5] MACEK, Jan. *Spalovací motory*. 2. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 2012. ISBN 978-80-01-05015-6.
- [6] KLIMENT, Vladimír. *Naftový motor přepřínovaný turbodmyčadlem*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989. Knižnice technických aktualit.
- [7] MARTYR, A.J. a M.A. PLINT. *Engine testing theory and practice*. 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007. ISBN 978-075-0684-392.
- [8] ŠTĚTINA, Josef. *Teorie spalovacích motorů: Paliva a spalování [přednáška]*. Brno: Vysoké učení technické, 2017.
- [9] ŠTĚTINA, Josef. *Teorie spalovacích motorů: Charakteristiky spalovacích motorů a jejich měření [přednáška]*. Brno: Vysoké učení technické, 2017.
- [10] ČSN. *Motory automobilové zkoušky na brzdovém stanovišti*. 1980. ČSN 30 2008, Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, Praha
- [11] SAE. *Engine Power Test Code – Spark Ignition and Compression Ignition – Net Power Rating*. 2004. SAE J1349, SAE International
- [12] DIN ISO. *Straßenfahrzeuge – Verfahren zur Ermittlung der Nettoleistung von Motoren*. 1997. DIN ISO 1585:1997-04, Deutsches Institut für Normung e. V.
- [13] GOST. *Density of oil. The tables for recalculation*. 2004. GOST P 8.610-2004
- [14] *Excalibur Army* [online]. [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <http://www.excaliburarmy.com/>
- [15] *National Institute of Standards and Technology: Pressure to Altitude* [online]. [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: ftp://ftp.nist.gov/pub/physics/lunarproject/References/Atmospheric_Properties/Pressure%20to%20Altitude%20Conversion%20%232.pdf
- [16] *Inetres: OT-62/TOPAS Armored Personnel Carrier* [online]. 2008 [cit. 2018-02-25]. Dostupné z: <http://www.inetres.com/gp/military/cv/inf/OT-62.html>

- [17] TES ELECTRIC DRIVES. Dynamometr vířivý WTS470: Návod k použití – strojní část. TES Vsetín s.r.o., 2014.
- [18] MOLER, Aleš. Dynamometr vířivý WTS470: Návod k použití – elektro část. TES Vsetín s.r.o., 2015.
- [19] *The Original Turbocharger Review: Parts of a turbo* [online]. 2018 [cit. 2018-01-10]. Dostupné z: <http://www.turbochargerreview.com/turbo-education/parts-of-a-turbo/>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a	[-]	Koeficienty přepočtových vztahů pro odhad vlivu atmosférických podmínek
CA	[-]	Korekční koeficient vzduchu podle SAE
CF	[-]	Korekční koeficient vlastností paliva podle SAE
e_m	[-]	Celková pružnost motoru
e_M	[-]	Momentová pružnost
e_N	[-]	Otáčková pružnost
F_d	[-]	Koeficient závislosti na hustotě paliva
F_v	[-]	Koeficient závislosti na viskozitě paliva
H_u	[kJ·kg ⁻¹]	Výhřevnost paliva
$H_{u,ref}$	[kJ·kg ⁻¹]	Referenční výhřevnost paliva
i	[-]	Počet otáček motoru na jeden pracovní cyklus
K	[-]	Korekční koeficient
k_{pal}	[-]	Korekční koeficient paliva
k_{vzd}	[-]	Korekční koeficient vzduchu
L_O	[kg]	Teoretické množství vzduchu
L_t	[kg]	Teoretické množství vzduchu
m	[-]	Koeficienty přepočtových vztahů pro odhad vlivu atmosférických podmínek
m_C	[kg]	Množství uhlíku
m_H	[kg]	Množství vodíku
m_O	[kg]	Množství kyslíku
m_p	[kg·h ⁻¹]	Hmotnostní spotřeba paliva
\dot{m}_p	[kg·s ⁻¹]	Hmotnostní množství paliva
$m_{p,přep}$	[kg·h ⁻¹]	Přepočítaná hmotnostní spotřeba paliva
$m_{p,ref}$	[kg·h ⁻¹]	Referenční hmotnostní spotřeba paliva
m_{pe_NT}	[g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹]	Měrná efektivní spotřeba
m_{pe_VT}	[g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹]	Měrná efektivní spotřeba ke korekci
m_s	[kg·s ⁻¹]	Skutečná hmotnost vzduchu ve válci motoru
m_S	[kg]	Množství síry
\dot{m}_s	[kg·s ⁻¹]	Hmotnostní množství vzduchu, které zůstává ve válci motoru
m_t	[kg·s ⁻¹]	Teoreticky možná hmotnost vzduchu ve válci motoru

M_t	[Nm]	Točivý moment
M_{t_NT}	[Nm]	Referenční točivý moment
M_{t_VT}	[Nm]	Točivá moment ke korekci
n	[-]	Koeficienty přepočtových vztahů pro odhad vlivu atmosférických podmínek
n_m	[min ⁻¹]	Otáčky motoru
P_{e_kor}	[kW]	Korigovaný výkon
p_b	[kPa]	Barometrický tlak vzduchu
p_{b_NT}	[kPa]	Referenční barometrický tlak
$p_{b_NT_průměr}$	[kPa]	Průměrná hodnota referenčního barometrického tlaku
p_{b_VT}	[kPa]	Barometrický tlak ke korekci
$p_{b_VT_průměr}$	[kPa]	Průměrná hodnota barometrického tlaku ke korekci
p_{bkor}	[kPa]	Korigovaný barometrický tlak
p_{bref}	[kPa]	Referenční barometrický tlak
P_e	[kW]	Efektivní výkon motoru
P_{e_NT}	[kW]	Referenční výkon
P_{e_ref}	[kW]	Referenční výkon
P_{e_VT}	[kW]	Efektivní výkon ke korekci
p_p	[kPa]	Tlak nasycených vodních par
p_{pl}	[kPa]	Plnicí tlak motoru
p_{pl_NT}	[kPa]	Referenční plnicí tlak motoru
p_{pl_VT}	[kPa]	Plnicí tlak motoru ke korekci
$P_{přepočet}$	[kW]	Přepočítaný výkon
p_s	[Pa]	Tlak vzduchu v sání motoru
p_{se}	[kPa]	Střední efektivní tlak
q	[-]	Koeficienty přepočtových vztahů pro odhad vlivu atmosférických podmínek
Q_p	[J]	Tepló dodané palivem do pracovního válce
r_s	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	Měrná plynová konstanta
S	[-]	Koeficient citlivosti viskozity
t	[°C]	Teplota paliva
t_{b_NT}	[°C]	Referenční teplota vzduchu
T_{b_NT}	[K]	Referenční teplota vzduchu
$T_{b_NT_průměr}$	[K]	Průměrná referenční teplota vzduchu
t_{b_VT}	[°C]	Teplota vzduchu ke korekci

T_{b_VT}	[K]	Teplota vzduchu ke korekci
$T_{b_VT_průměr}$	[K]	Průměrná teplota vzduchu ke korekci
T_{bkor}	[K]	Korigovaná teplota vzduchu
T_{bref}	[K]	Referenční teplota vzduchu
T_{pl}	[K]	Teplota plicního vzduchu
T_{pl_NT}	[°C]	Referenční teplota plicního vzduchu
T_{pl_VT}	[°C]	Teplota plicního vzduchu ke korekci
T_s	[K]	Teplota vzduchu v sání motoru
t_{vz}	[°C]	Teplota okolního vzduchu
T_w	[K]	Teplota chladicího média na vstupu do chladiče plicního vzduchu
V_p	[l·h ⁻¹]	Objemová spotřeba paliva
$V_{pal,ref}$	[l·h ⁻¹]	Referenční objemová spotřeba paliva
V_V	[m ³ ·s ⁻¹]	Spotřeba vzduchu
V_z	[m ³]	Zdvihový objem
V_Z	[l]	Zdvihový objem
α	[-]	Stupeň vypláchnutí spalovacího prostoru
ε	[-]	Kompresní poměr
η_e	[-]	Efektivní účinnost
η_{e_NT}	[-]	Referenční efektivní účinnost
η_m	[-]	Mechanická účinnost motoru
η_{pl}	[-]	Plicní účinnost
λ	[-]	Součinitel přebytku vzduchu
ν	[m ² ·s ⁻¹]	Viskozita nafty
ρ_{pal_NT}	[kg·m ⁻³]	Referenční hustota paliva
ρ_{pal_VT}	[kg·m ⁻³]	Hustota paliva ke korekci
ρ_{pl}	[kg·m ⁻³]	Hustota plicního vzduchu
ρ_s	[kg·m ⁻³]	Hustota vzduchu
φ_b	[-]	relativní vlhkost vzduchu
φ_{b_NT}	[%]	Referenční relativní vlhkost vzduchu
$\varphi_{b_NT_průměr}$	[%]	Průměrná referenční relativní vlhkost vzduchu
φ_{b_VT}	[%]	Relativní vlhkost vzduchu ke korekci
$\varphi_{b_VT_průměr}$	[%]	Průměrná relativní vlhkost vzduchu ke korekci
ω	[rad·s ⁻¹]	Úhlová rychlost

Zkratky:

<i>CČ</i>	Cetanové číslo
<i>ČR</i>	Česká Republika
<i>MNČ</i>	Metoda nejmenších čtverců
<i>NT</i>	Nižší teplota
<i>OT</i>	Obrněný transportér
<i>RPG</i>	Ruční protitankový granátomet
<i>VD</i>	Vířivý dynamometr
<i>VT</i>	Vyšší teplota

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha I. TAKTICKO-TECHNICKÁ CHARAKTERISTIKA
- Příloha II. KALIBRACE ZKUŠEBNÍHO STANOVIŠTĚ
- Příloha III. MĚŘENÍ NA MOTOROVÉM STANOVIŠTI
- Příloha IV. SCHÉMA MOTOROVÉ ZKUŠEBNY V AREÁLU FIRMY EXCALIBUR ARMY SPOL. S R.O. VE ŠTERNBERKU
- Příloha V. VÝPOČTOVÁ ČÁST PROVEDENÁ V PROGRAMU PTC MATHCAD PRIME 4.0