



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

OPTIMALIZACE ELEKTRICKÉHO NAPÁJENÍ DOMOVNÍHO KOTLE NA TUHÁ DŘEVNÍ PALIVA

OPTIMIZATION OF ELECTRIC POWER CONSUMPTION OF GASIFICATION WOOD BOILER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. VOJTĚCH FEJTA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARIAN BRÁZDIL, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Bc. Vojtěch Fejta
Studijní program:	Energetické a termofluidní inženýrství
Studijní obor:	Energetické inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Marian Brázdil, Ph.D.
Akademický rok:	2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Optimalizace elektrického napájení domovního kotle na tuhá dřevní paliva

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Moderní domovní nízkoemisní spalovací kotle na tuhá dřevní paliva vyžadují pro svůj provoz elektrickou energii, stejně jako externí příslušenství těchto kotlů. Na trhu je možné v současnosti nalézt kotle s různým stupněm automatizace i uživatelskými funkcemi zvyšující komfort spotřebitele, s rozdílnými výkonovými parametry i výslednou cenou zařízení. V souvislosti s tím, napříč jednotlivými kategoriemi, se mohou i významně lišit elektrické příkony kotlů. Elektrický příkon je současně parametrem, který spotřebitel ne vždy zohledňuje, přestože spotřeba související s napájením domovních spalovacích zařízení se může významnou měrou podílet na celkové spotřebě elektřiny jak na lokální, tak globální úrovni.

Cíle diplomové práce:

Popis současného stavu a legislativních požadavků vztahujících se k provozu domovních spalovacích zařízení na tuhá dřevní paliva.

Popis konstrukce hlavních elektrických komponent domovních kotlů, přehled využívaných typů ventilátorů a oběhových čerpadel, srovnání jejich výkonových parametrů.

Srovnání celkových elektrických příkonů komerčně dostupných kotlů na tuhá dřevní paliva o tepelných výkonech do 40 kW.

Provedení analýzy a návrhu konstrukčních úprav vedoucích k optimalizaci elektrického příkonu vybraného domovního kotle, realizace navržených opatření.

Vyhodnocení naměřených dat, zhodnocení provozu kotle.

Seznam doporučené literatury:

BLEIER, F. P. Fan handbook: selection, application, and design. 1st. ed. McGraw Hill, USA, 1997.
ISBN: 978-0070059337

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato diplomová práce řeší optimalizaci elektrického napájení domovního kotle. Cílem byl popis legislativních požadavků na domovní kotle, srovnání jejich elektrických příkonů, popis konstrukce hlavních elektrických komponent domovních kotlů, srovnání jejich parametrů, provedení analýzy a návrhu konstrukčních úprav vedoucích ke snížení elektrického příkonu vybraného domovního kotle a realizace navržených opatření. Práce je rozdělena na čtyři hlavní kapitoly, první dvě se věnují kotlům a jejich elektrickým komponentům. Ve třetí kapitole je navrženo nové oběžné kolo ventilátoru kotle a další úpravy, které mají vést ke snížení příkonu. Poslední čtvrtá kapitola se věnuje konstrukci, sestavení a testování těchto úprav.

Summary

This thesis deals with the optimization of the electrical supply of a domestic boiler. The objectives were description of the legislative requirements for domestic boilers, comparison of their electrical input, description of the design of the main electrical components of domestic boilers, comparison of their parameters, analysis and design of constructional modifications leading to reduction of the electrical input of the selected domestic boiler and implementation of the proposed measures. The thesis is divided into four main chapters, the first two are devoted to boilers and their electrical components. In the third chapter, a new boiler blower impeller and other modifications are designed to reduce the power consumption. The last fourth chapter deals with the design, assembly and testing of these modifications.

Klíčová slova

kotel, příkon, ventilátor, účinnost, BLDC motor

Keywords

boiler, input power, blower, efficiency, BLDC motor

FEJTA, V. *Optimalizace elektrického napájení domovního kotle na tuhá dřevní paliva*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2023. ?? s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marian Brázdil, Ph.D..

Prohlašuji, že jsem Diplomovou práci na téma Optimalizace elektrického napájecího domovního kotle na tuhá dřevní paliva vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Bc. Vojtěch Fejta

Děkuji tímto Ing. Marianu Brázdilovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce.

Bc. Vojtěch Fejta

Obsah

Úvod	3
1 Domovní kotle	4
1.1 Legislativní požadavky	4
1.2 Srovnání elektrických příkonů kotlů	6
2 Elektrické komponenty kotle	16
2.1 Srovnání elektrických příkonů ventilátorů a čerpadel	16
2.2 Oběhové čerpadlo	24
2.3 Ventilátor	26
2.3.1 Teorie, definice a základní pojmy	26
2.3.2 Konstrukce ventilátorů	32
2.3.3 Pohon ventilátorů	36
3 Optimalizace ventilátoru	40
3.1 Stávající parametry	40
3.1.1 Kotel	40
3.1.2 Ventilátor	41
3.1.3 Provozní bod	42
3.2 Optimalizace účinnosti ventilátoru	43
3.2.1 Postup řešení	44
3.3 Výpočet oběžného kola	44
3.3.1 Výběr vhodného typu kola	46
3.3.2 Varianta A	47
3.3.3 Varianta B	52
3.4 Výběr vhodného BLDC motoru	56
3.4.1 Faulhaber	58
3.4.2 Nanotec	60
3.5 Návrh oběžného kola	63
3.5.1 Varianta A	63
3.5.2 Varianta B	64
3.5.3 Srovnání výsledků	66
3.6 Návrh spirální skříně a ostatních komponent	66
3.6.1 Varianta B1	67
3.6.2 Varianta B2	69
4 Realizace návrhu	71
4.1 Oběžné kolo B	71
4.1.1 Test oběžného kola	72
4.2 Spirální skříně B1	72
4.3 Spirální skříně B2	76
Závěr	78
Seznam zdrojů	78

Seznam příloh	84
1 Parametry kotle EKOScroll DELTA S	84
2 Parametry ventilátoru WPA 06	86
3 Parametry motoru 4221 G018 BXT	89
4 Parametry motoru 3216 W009 BXT	92
5 Parametry řídicí jednotky s MC 5005	95
6 Parametry motoru DF45S024053-A2	98
7 Parametry řídicí jednotky CSL3-5	100

Úvod

Domovní kotle jsou často využívaným zdrojem tepla pro vytápění v České republice. Lokální topidla jako právě kotle jsou využívány téměř ve dvou třetinách českých bytů. Jednoznačně nejrozšířenější jsou kotle na plyn, velká část je pak tvořena kotli spalujícími tuhá paliva, jako například uhlí, koks, uhelné brikety, ale také dřevní pelety, nebo přímo kusové dřevo, poslední skupinu tvoří elektrokotle [1].

Postupné přecházení na ekologičtější vytápění je ve společnosti jasným trendem, časté je i přecházení na lokální topidla v podobě domácího kotle. Z pohledu emisí škodlivých plynů i tuhých znečišťujících látek (TZL) jsou na tom nejhůře staré neekologické kotle na tuhá paliva, ty je proto vhodné vyměnit za novější. Kotle jsou stále zdokonalovány a je zvyšována jejich celková účinnost a kvalita spalování, výrazně se také upouští od neekologických paliv, jako je uhlí nebo koks, a přechází se na biopaliva v podobě dřevní štěpky nebo pelet. Jedním z hlavních důvodů jsou nařízení EU. Například mezi roky 2011 a 2021 přestalo téměř sto tisíc domácností topit uhelnými palivy a začalo využívat paliva dřevěná [1]. Zpřísnování emisních limitů během posledních patnácti let a dotační programy jsou pak důvodem či motivací pro výměnu starého neekologického kotle za nový. Důvodem však nemusí být jen legislativní požadavky na snižování emisních limitů, ale v poslední době také prudké narůstání cen za energie a plyn, nebo také jistá snaha osamostatnit se odpojením od například dálkového vytápění.

Moderních nízkoemisních kotlů na tuhá dřevní paliva stále přibývá. Tato zařízení však pro svůj provoz vyžadují elektrickou energii, a velmi často také externí příslušenství. Na trhu je možné nalézt širokou nabídku nízkoemisních kotlů jejichž příkony se v závislosti na výkonových parametrech a stupni automatizace výrazně liší a mohou se významnou měrou podílet na celkové spotřebě elektřiny uživatele.

Cílem této diplomové práce je provedení analýzy a návrhu konstrukčních úprav vedoucích k optimalizaci elektrického příkonu vybraného domovního kotle. Práce je rozdělena na čtyři kapitoly, první se věnuje popisu domovních kotlů na tuhá dřevní paliva a aktuálních legislativních požadavků vztahujícím se k jejich provozu. Dále je zde provedena a vyhodnocena obsáhlá rešerše parametrů domovních kotlů dostupných na trhu, se zaměřením především na jejich výkon, příkon a účinnost. Druhá kapitola se věnuje blíže jednotlivým komponentám kotle, které mají vlastní spotřebu, konkrétně jde o oběhová čerpadla a ventilátory. Na začátku je provedena a vyhodnocena rešerše ventilátorů a oběhových čerpadel dostupných na trhu, se zaměřením především na jejich výkon, příkon a účinnost. Na základě těchto parametrů jsou pak srovnány jejich elektrické příkony. V poslední části této kapitoly jsou čerpadla a ventilátory detailněji popsány. Třetí nejobsáhlejší kapitola se věnuje optimalizaci příkonu ventilátoru, jsou zde rozebrány stávající parametry původního ventilátoru a vybraného domovního kotle. Dále jsou zde navrženy dvě nové úspornější varianty ventilátoru, a nakonec je pro ně vybrán vhodný pohon. Čtvrtá a poslední kapitola se věnuje výrobě, sestavení a testování nově navrženého ventilátoru, k tomu bylo využito technologie 3D tisku.

1. Domovní kotle

Malé domovní kotle jsou navrženy pro vytápění menších objektů, jako jsou rodinné domy či menší bytové jednotky. Hlavní funkcí malých domovních kotlů je přeměna energie paliva na teplo. Toto teplo je poté distribuováno do vytápěcího systému objektu, což zajišťuje účinné a rovnoměrné vytápění prostor. Při volbě vhodného kotle se zohledňují faktory jako energetická náročnost objektu, výkon kotle, dostupnost paliva a v neposlední řadě také finanční možnosti majitele.

Na rozdíl od dálkového vytápění, které je často považováno za ekologičtější, pohodlnější a jednodušší na instalaci, malé domovní kotle představují alternativu pro ty, kteří hledají individuální řešení vytápění. Jednou z nevýhod malých domovních kotlů je, že vyžadují častější údržbu a čištění, což může být pro uživatele zátěží. Navíc mohou být kotle na tuhá paliva méně ekologické než dálkové vytápění, a to především kvůli vyšším emisím skleníkových plynů a prachových částic.

Kotle bývají rozděleny do několika základních kategorií podle druhu paliva, které využívají. Patří sem plynové kotle, které využívají zemní plyn či propan-butan, elektrické kotle, které získávají energii z elektrické sítě, a kotle na tuhá paliva, které spalují uhlí, dřevo, pelety nebo brikety. Jak již z názvu vyplývá, dalších částech práce bude věnována pozornost zplyňovacím kotlům na tuhá dřevní paliva.

Jejich hlavním principem je zplyňování dřevní hmoty, což je proces, při kterém jsou plyny uvolněné ze dřeva za vysokých teplot spalovány. Tento způsob spalování je efektivnější a ekologičtější než spalování dřeva přímo v plamenech. Oproti tradičním odhořívacím kotlům, které byly dříve široce používány, mají zplyňovací kotle na tuhá dřevní paliva několik výhod. V první řadě je zde vyšší účinnost spalování, která se díky zplyňovacímu procesu často pohybuje okolo 90 %, někdy i výše (viz rešerše kotlů v oddílu 1.2). To znamená, že větší část energie obsažené v palivu je přeměněna na teplo, což vede k úsporám paliva a snižuje náklady na vytápění. Zplyňovací kotle na tuhá dřevní paliva také produkují méně emisí než odhořívací kotle. Díky zplyňovacímu procesu a efektivnímu spalování vzniká méně škodlivých látek, jako jsou oxidy dusíku, oxidy síry a prachové částice. Tímto způsobem jsou tyto kotle šetrnější k životnímu prostředí. Navíc jsou zplyňovací kotle schopny zpracovávat širší škálu tuhých dřevních paliv, jako jsou například dřevní štěpky, pelety, brikety nebo kusové dřevo. Tato flexibilita umožňuje uživatelům snadněji vybírat mezi různými palivy v závislosti na dostupnosti a ceně.

1.1. Legislativní požadavky

Legislativa týkající se kotlů se postupně vyvíjí a mění, před samotným popisem aktuálních legislativních požadavků je vhodné uvést stručný vývoj z minulých let. Zásadní požadavky vztahující se k provozu domovních spalovacích zařízení na tuhá dřevní paliva vychází z nařízení a norem Evropské unie, nebo přímo ze zákonů daného státu. Tyto zákony často plynou ze směrnic EU a mohou klást i přísnější požadavky než směrnice samotná. Jednou z hlavních je norma **ČSN EN 303-5** ta byla v ČR zavedena v roce 2000 (převzetím z evropské normy EN 303-5:1999) a platila, mimo jiné, pro teplovodní kotle na pevná paliva do jmenovitého výkonu 300 kW. Tato norma rozdělovala kotle do tříd 1, 2 a 3, třída 3 znamenala nejkvalitnější a nejkologičtější kotel [2].

V roce 2005 byla zavedena Evropská směrnice **2005/32/ES**, tzv. směrnice EuP (Energy using Products), která definuje rámcová pravidla a kritéria pro stanovení požadavků na zařízení potřebujících ke svému provozu elektrickou energii. Následně byla v roce 2009 přijata širěji zaměřená Směrnice **2009/125/ES** tzv. směrnice ErP (Energy related Products), nebo také tzv. **Směrnice o Ekodesignu**. Tato směrnice se zabývá se i výrobky, které přímo nespotřebovávají elektrickou energii, ale ovlivňují její spotřebu (např. okna, dveře apod.).

Důležitým je rok 2012, v tomto roce vstoupil v platnost **zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší**, který mimo jiné také stanovuje další emisní limity a sankce v případě jejich překročení [3]. V platnost vstoupila také **vyhláška č. 415/2012 Sb.** o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. V tomto roce byla také přijata novelizovaná norma EN 303-5, v ČR převzata jako **ČSN EN 303-5**, hlavní změnou je přidání dalších dvou tříd, konkrétně třídy 4 a 5 [2]. Tato norma byla během let ještě dvakrát novelizována, konkrétně v roce 2022 a nejaktuálnější verze (ČSN EN 303-5+A1) nabyla účinnosti 1.5.2023 [4].

Aktuální platné dokumenty v České republice, týkající se požadavků na domovní kotle jsou: zákon č. 201/2012 Sb. Zákon o ochraně ovzduší, Vyhláška č. 415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší a norma ČSN EN 303-5+A1. Důležitou roli hraje také směrnice o Ekodesignu (2009/125/ES).

Norma ČSN EN 303-5+A1

Tento dokument se vztahuje na topné kotle do jmenovitého tepelného výkonu 500 kW, určené k spalování tuhých paliv. Zahrnuje také kotle na pevná paliva s přívodem spalovacího vzduchu z vnějšího prostředí a zařízení s uzavřeným prostorem. Kotle mohou pracovat s přirozeným tahem nebo s nuceným tahem. Přikládání paliva může být prováděno ručně nebo automaticky. Kotle mohou fungovat v nekondenzačním nebo kondenzačním režimu [4]. Nejdůležitější změny vyplývající z normy ČSN EN 303-5 v oblasti prodeje a užívání domácích kotlů jsou [5, 6]:

- Leden 2014 – zákaz prodeje kotlů 1. a 2. emisní třídy
- Leden 2017 – povinnost revizí kotlů včetně zařazení do tzv. emisních tříd
- Leden 2018 – zákaz prodeje kotlů 3. emisní třídy
- Leden 2020 – zákaz prodeje kotlů 4. emisní třídy
- Září 2024 – zákaz užívání kotlů 1. a 2. emisní třídy

Zákaz užívání kotlů 1. a 2. třídy měl platit už v září roku 2022, ale z důvodů špatné dostupnosti kotlů a rostoucích cen energií, v souvislosti se situací ve světě, byl zákaz posunut o 2 roky. Někteří výrobci ale tvrdí, že je to jen odklad nevyhnutelného problému a všechny kotle se vyměnit nestihnou. [6]

1.2. SROVNÁNÍ ELEKTRICKÝCH PŘÍKONŮ KOTLŮ

Směrnice 2009/125/ES

Rozšíření normy ČSN je takzvaná Směrnice o ekodesignu, upravující především ekodesign ve společenství Evropské Unie. Tato směrnice upravuje různé aspekty, jako je dovoz, uvedení na trh a provoz, a také stanovuje povinnosti dovozců. Důležité prvky obsažené ve Směrnici č. 2009/125 zahrnují pojem shody (včetně předpokladu shody a posuzování shody) a harmonizované normy. Hlavním cílem směrnice je uvést do souladu dovážené kotle z ne-EU zemí a umožnit jejich uvedení na evropský trh. Směrnice také klade důraz na informování spotřebitele a možné sankce. [7]

Zákon č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší

Je hlavním zdrojem informací o ochraně ovzduší, byl přijat v roce 2012. Tento zákon, který implementuje evropskou legislativu, se zabývá různými aspekty ochrany ovzduší. Jednou z jeho částí je také regulace znečištění a znečišťování životního prostředí. Tento zákon se skládá z devíti částí a obsahuje také přílohy, které detailně popisují různé aspekty ochrany ovzduší.

V rámci regulace emisí stanovuje zákon o ochraně ovzduší emisní limity musí být dodrženy na každém komínovém průduchu nebo výduchu do ovzduší [3]. Tyto omezení mají za cíl minimalizovat negativní vliv emisí na kvalitu ovzduší a životní prostředí.

Zákon o ochraně ovzduší stanovuje také imisní limity pro různé látky a omezuje jejich maximální počet a délku překročení. Hlavní pozornost je věnována sledovaným látkám, které mají negativní vliv na kvalitu ovzduší a zdraví obyvatel. Mezi ty patří oxidy síry, oxidy dusíku, oxid uhelnatý, benzen, pevné částice (PM10, PM2,5) a olovo [3]. Tyto látky jsou považovány za sledované polutanty, což znamená, že jsou pečlivě monitorovány a jejich přítomnost v ovzduší je sledována z důvodu ochrany životního prostředí a zdraví lidí.

1.2. Srovnání elektrických příkonů kotlů

V rámci srovnání příkonů kotlů byla provedena rešerše domovních kotlů na tuhá dřevní paliva s výkonem do 40 kW. V rámci této rešerše byly nasbírány data 332 domovních kotlů, konkrétně jde o jejich výkon, příkon při různých provozech, účinnost při různých provozech, jejich emisní třídu a třídu energetické účinnosti. Data jsou zobrazeny v seznamu na konci tohoto oddílu a shrnuty v několika grafech na následujících stranách.

Přestože výrobci jsou povinni všechny tyto informace uvádět, často tomu tak nebylo. Proto nejsou některá data ve výsledné tabulce uvedena. Nejčastěji uváděné hodnoty v katalogových listech jsou: Jmenovitý tepelný výkon, minimální tepelný výkon, elektrický příkon při jmenovitém tepelném výkonu, účinnost při jmenovitém tepelném výkonu a emisní třída. Naopak nejméně uváděné hodnoty jsou: Maximální elektrický příkon (v případě automatického zapalování může být několikanásobně vyšší než při jmenovitém provozu), užitečná účinnost, účinnost při minimálním tepelném výkonu a elektrický příkon při minimálním tepelném výkonu.

Důležité je třeba upozornit na fakt, že kotle při běžném provozu často nedosahují hodnot uvedených výrobcem. Tyto hodnoty bývají získávány při měření za ideálních podmínek, kterých nemusí být během běžného provozu dosaženo. Jedná se zejména o hodnoty účinností. Z tohoto důvodu je výpovědní hodnota níže uvedených dat omezená. Z tohoto

důvodu jsou jednotlivé body v následujících grafech značně rozptýlené a nemá smysl zavádět například spojnice trendů. Závěry z těchto grafů jsou proto popsány slovně.

Nejdůležitější jsou v rámci této práce hodnoty elektrických příkonů a účinností kotlů. Elektrický příkon při jmenovitém tepelném výkonu se pohybuje v rozmezí od 15 W do 354 W, při minimálním tepelném výkonu od 10 W do 95 W. Při jmenovitém tepelném výkonu mají automatické kotle vyšší hodnoty příkonů, toto platí nejen pro krajní hodnoty, ale obecně viz tab. 1.1 a graf 1.1. Při minimálním tepelném výkonu jsou na tom automatické kotle naopak lépe a hodnoty jejich příkonu jsou nižší, než ty u kotlů zplyňovacích, viz tab. 1.1 a graf 1.2

Výraznější snížení příkonu při stejném snížení tepelného výkonu zplyňovacích a automatických kotlů je patrné také z grafů 1.3 a 1.4. V případě automatických kotlů jsou dva shluky bodů téměř separované a překrývají se jen malou částí, ale v případě kotlů zplyňovacích se zcela překrývají. Vzhledem k malému množství nalezených hodnot elektrických příkonů zplyňovacích kotlů při jejich minimálním tepelném výkonu může být tento závěr zavádějící.

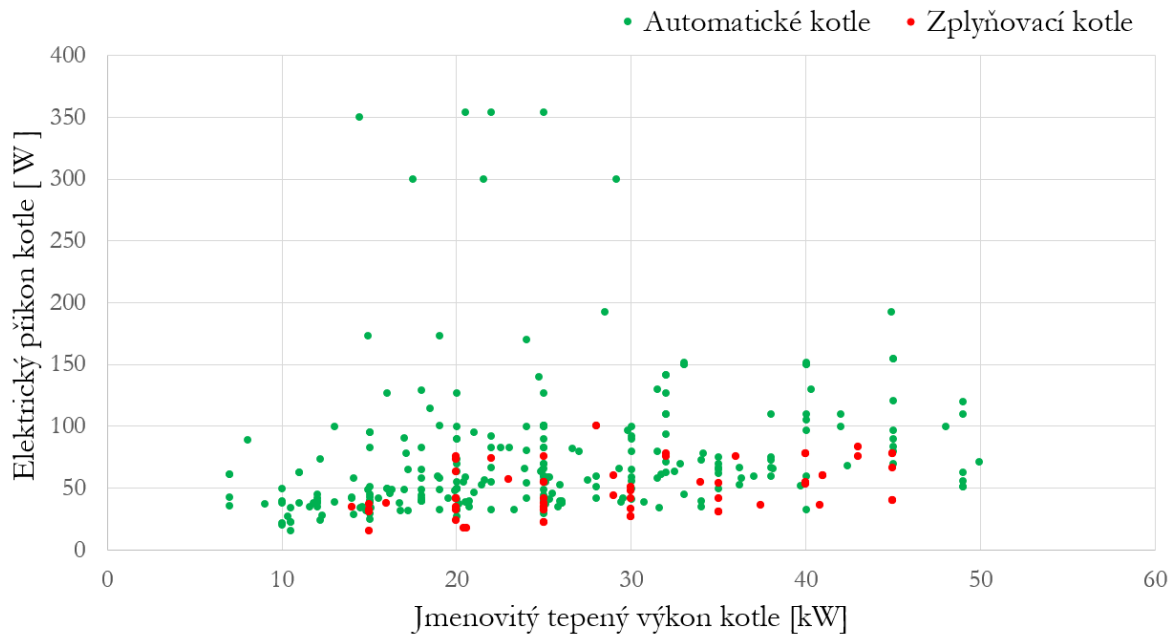
Tabulka 1.1: Vyhodnocení získaných údajů o domovních kotlech.

		jmenovitý výkon	minimální výkon	el. příkon při jm. výkonu	el. příkon při min. výkonu	účinnost při jm. výkonu
		<i>kW</i>	<i>kW</i>	<i>W</i>	<i>W</i>	%
všechny kotle	min. hodnota	7	2	15	10	80
	max. hodnota	50	23	354	95	98
	průměr	25.6	8.0	69.9	32.7	90.1
	medián	25.0	7.2	57.0	29.0	90.8
pouze kotle zplyňovací	min. hodnota	14	7	15	31	80
	max. hodnota	45	23	100	52	92
	průměr	29.2	15.5	48.7	38.0	87.4
	medián	28.5	15.0	42.0	31.0	89.4
pouze kotle automatické	min. hodnota	7	2	16	10	84
	max. hodnota	50	16	354	95	98
	průměr	24.7	7.2	75.2	32.5	90.8
	medián	24.0	6.5	60.0	28.0	91.1

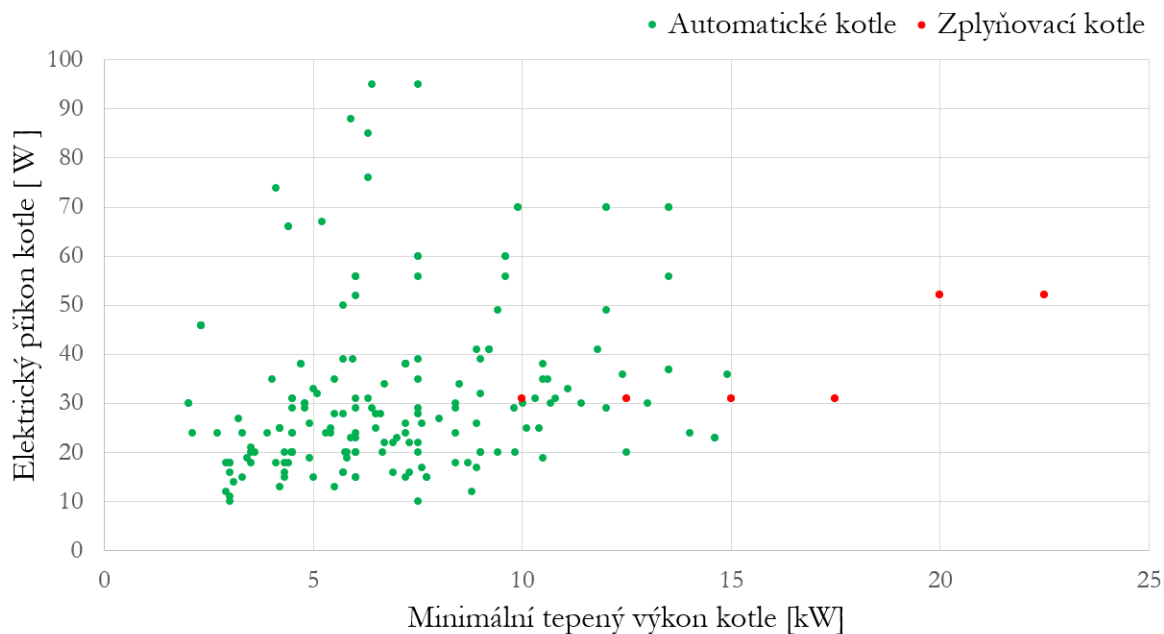
Na posledním graf (1.5) je zobrazena závislost účinnosti kotle při jeho jmenovitém tepelném výkonu. Graf opět srovnává automatické a zplyňovací kotle. Je patrné, že automatické kotle dosahují obecně vyšších účinností. Zajímavá je také skutečnost, že účinnost v tomto případě nemá tendenci být vyšší u kotlů s větším tepelným výkonem, jak by

1.2. SROVNÁNÍ ELEKTRICKÝCH PŘÍKONŮ KOTLŮ

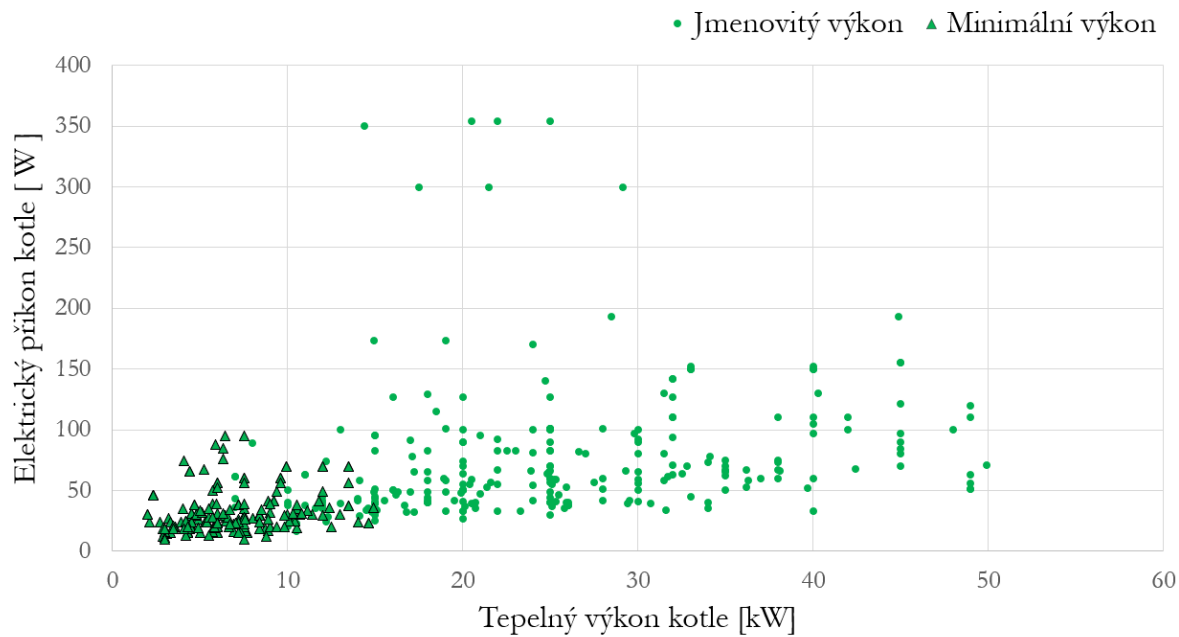
mohlo být očekáváno. V celém rozsahu nalezených kotlů, od 7 do 50 kW je účinnost přibližně konstantní.



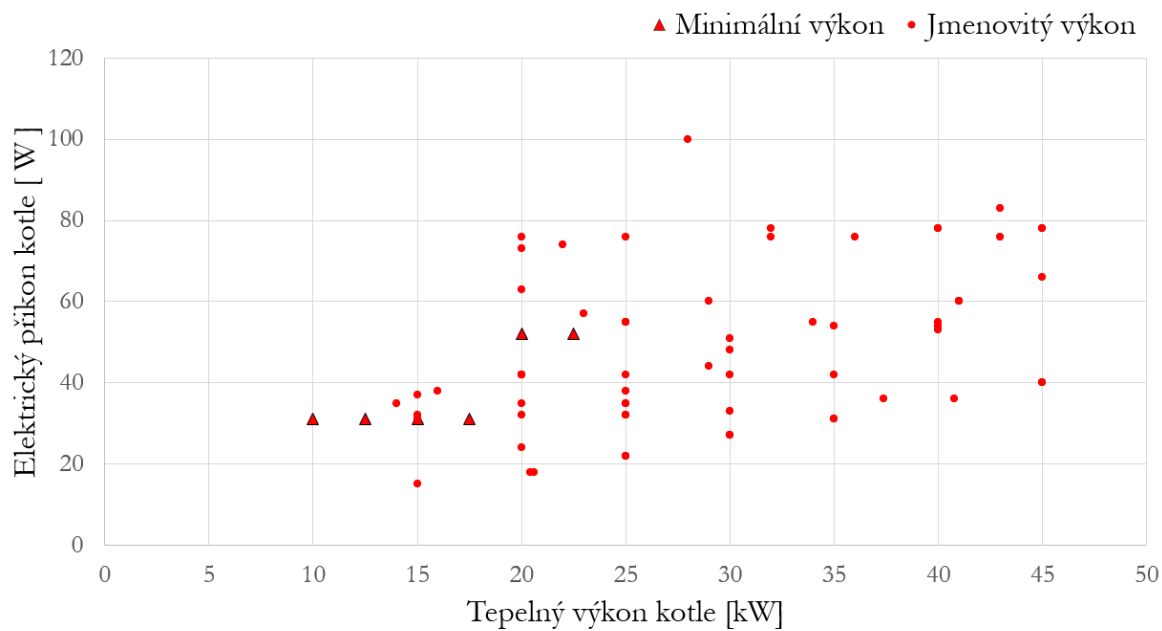
Obrázek 1.1: Elektrický příkon automatických a zplyňovacích kotlů při jejich jmenovitém tepelném výkonu podle katalogových listů výrobců kotlů. stav k 11/2022



Obrázek 1.2: Elektrický příkon automatických a zplyňovacích kotlů při jejich minimálním tepelném výkonu podle katalogových listů výrobců kotlů. stav k 11/2022

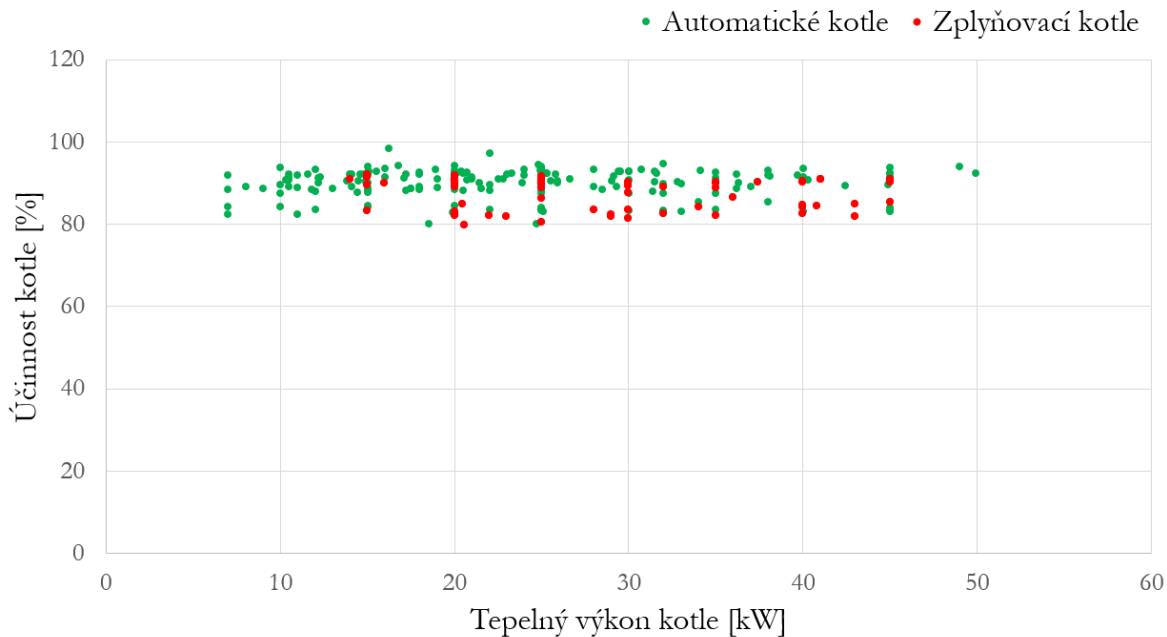


Obrázek 1.3: Elektrický příkon zplyňovacích kotlů při jejich jmenovitém a minimálním tepelném výkonu podle katalogových listů výrobců kotlů. stav k 11/2022



Obrázek 1.4: Elektrický příkon automatických kotlů při jejich jmenovitém a minimálním tepelném výkonu podle katalogových listů výrobců kotlů. stav k 11/2022

1.2. SROVNÁNÍ ELEKTRICKÝCH PŘÍKONŮ KOTLŮ



Obrázek 1.5: Účinnost automatických a zplyňovacích kotlů při jejich jmenovitém tepelném výkonu podle katalogových listů výrobců kotlů. stav k 11/2022

Rešerše byla provedena u následujících výrobců kotlů: Agromechanika [8], Atmos [9], Attack [10], Benekov [11], Centrometal Tehnika Grijanja [12], Defro [13], Easypell (Eco Engineering) [14], Ekogalva [15], Elektromet [16], ETA Heiztechnik [17], Fröling [18], Galmet [19], Kalor [20], Kolton [21], Kovarson [22], Metal-Fach [23], Moderator [24], Opop [25], Petrojet [26], Ponast [27], Rojek [28], SAS [29], Slokov [30], Verner [31], Windhager [32]. Uvedeny jsou v následující tabulce.

2. Elektrické komponenty kotle

U zplyňovacího kotle na tuhá paliva patří mezi komponenty s vlastní spotřebou hlavně cirkulační čerpadlo a ventilátor na přívod spalovacího vzduchu, nebo ventilátor odtahový (odtah spalin). Může sem také patřit řídicí elektronika, ta však bude mít v porovnání s ventilátory, nebo čerpadly spotřebu relativně malou. Pokud má být snížena vlastní spotřeba domovního kotle, pak je na místě určit komponentu, nebo komponenty, které k této spotřebě nejvíce přispívají. Z tohoto důvodu byla provedena rešerše na trhu dostupných ventilátorů a oběhových čerpadel, Výsledky pak byly vyhodnoceny a srovnány v následujícím oddíle [1.2](#).

2.1. Srovnání elektrických příkonů ventilátorů a čerpadel

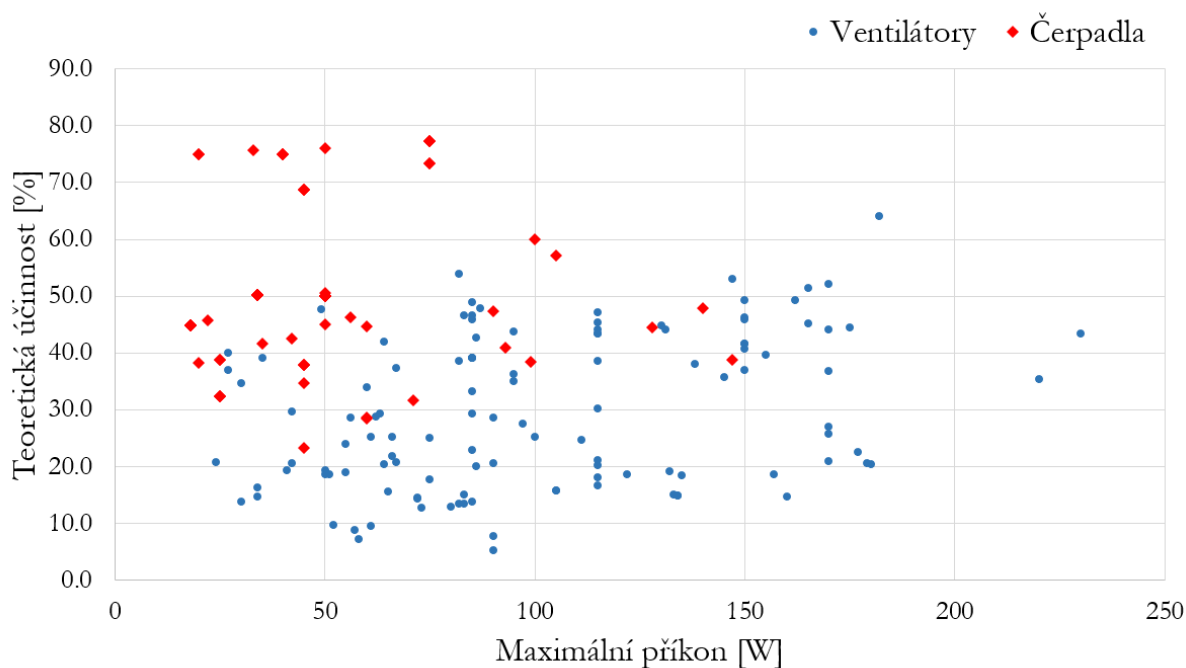
Pro srovnání příkonů byla provedena rešerše ventilátorů a čerpadel s příkonem do 200 W, což je pro domovní kotle v výkonem do 40 W adekvátní. V rámci této rešerše byly nasbírány data 128 čerpadel a 120 ventilátorů. V případě čerpadel jde konkrétně o jejich DN, PN, index EEI, příkon, dopravní výšku a průtok, na základě těchto hodnot byla pak vypočtena teoretická hodnota jejich účinnosti. U ventilátorů se jedná o typ jejich lopatek, typ motoru, otáčky, maximální příkon, celkový tlak a průtok. A stejně jako v případě čerpadel byla na základě těchto hodnot vypočtena teoretická hodnota jejich účinnosti.

Tyto data jsou zobrazena v seznamu na konci tohoto oddílu a shrnuty v tabulce [2.1](#) a grafu [2.1](#) na následujících stranách. Z tabulky [2.1](#) je zřejmé, že čerpadla dosahují obecně výrazně vyšších účinností, což je znázorněno také na grafu [2.1](#), kde jsou srovnány teoretické účinnosti čerpadel a ventilátorů v závislosti na jejich maximálním příkonu. V tomto případě jsou i jejich výkony nižší, to ale obecně nemusí platit, například v případě rozlehlé vytápěcí soustavy musí mít čerpadlo výkon vyšší, aby byla překonána tlaková ztráta otopné soustavy.

2. ELEKTRICKÉ KOMPONENTY KOTLE

Tabulka 2.1: Vyhodnocení získaných údajů ventilátorů a čerpadel.

		jmenovitý výkon	maximální příkon	teoretická účinnost
			W	%
čerpadla	min. hodnota	8	5	23,2
	max. hodnota	67	153	77,3
	průměr	25,1	52,8	50,5
	medián	17,5	45,0	47,8
ventilátory	min. hodnota	4	24	5,2
	max. hodnota	240	230	64,1
	průměr	35,0	101,7	29,6
	medián	25,1	90,0	28,0



Obrázek 2.1: Srovnání teoretických účinností ventilátorů a čerpadel v závislosti na jejich maximálním příkonu.

Celkově lze říci, že zlepšením účinnosti ventilátorů pro domovní kotle lze dosáhnout značné úspory. Z těchto důvodů je v této práci soustředěna pozornost hlavně na ventilátory pro spalovací vzduch, jejich optimalizace by totiž měla největší efekt.

2.1. SROVNÁNÍ ELEKTRICKÝCH PŘÍKONŮ VENTILÁTORŮ A ČERPADEL

Jak je již zmíněno výše, hodnoty účinnosti jsou pouze vypočtené, výrobce je bohužel neuvádí. K jejich výpočtu bylo využito vztahu 2.1 [45] pro ventilátory a 2.2 [47] pro čerpadla.

$$\eta = \frac{\Delta p_{cv} Q_v}{P_{o max}} \quad [-] \quad (2.1)$$

kde Δp_{cv} je celkový tlak ventilátoru v pracovním bodě, Q_v [m^3/hod] průtok ventilátorem v pracovním bodě a $P_{o max}$ [W] maximální příkon motoru ventilátoru.

$$\eta = \frac{\rho g H Q_v}{P_{o max}} \quad [-] \quad (2.2)$$

kde ρ [$kg \cdot m^{-3}$] je hustota média (vody), g [$m \cdot s^{-2}$] tíhová konstanta, H [m] dopravní výška čerpadla v pracovním bodě, Q_v [m^3/hod] průtok čerpadlem v pracovním bodě a $P_{o max}$ [W] maximální příkon motoru čerpadla. Tyto veličiny a pojmy budou lépe vysvětleny v následujících kapitolách.

Rešerše byla provedena u následujících výrobců: Biral [33], Blauberg Motoren [34], Calpeda [35], Casals Ventilation [36], DAB [37], EBM Papst [38], Grundfos [?], Lowara [?], MplusM [41], Novaservis [42], Salus Contols [43] a Wilo [44].

2. ELEKTRICKÉ KOMPONENTY KOTLE

Tabulka 2.2: Parametry oběhových čerpadel pro domovní kotle

Výrobce	Řada	Model	DN	Teoretický jmenovitý výkon	Minimální příkon	Max. příkon	PN	Jmenovitá dopravní výška	Maximální dopravní výška	Obj. průtok	Teoretická účinnost	EEl
			mm	W	W	W	bar	m	m	m ³ /hod	%	
Biral	A	12	25		8	33	10		4			0.21
Biral	A	13	25		8	50	10		5			0.21
Biral	A	14	25		8	70	10		6			0.22
Biral	A	15	25		8	107	10		8			0.22
Biral	CompAX	15-1 175 BLUE RV KH	15		3	5	10		1			
Biral	CompAX	15-1.6 175 BLUE RV KH	15		4	9	10		1.6			
Biral	CompAX	15-2.5 175 BLUE RV KH	15		4	14	10		2.5			
Biral	CompAX	25-4 180 RED	25		3	19	10		4			0.18
Biral	CompAX	25-6 180 RED	25		4	35	10		6			0.19
Biral	CompAX	25-8 180 RED	25		6	51	10		7.5			0.2
Biral	Modula	25-10 180 RED	25		7	153	10		10			0.18
Biral	Modula	25-4 180 RED	25		7	49	10		4			0.18
Biral	Modula	25-6 180 RED	25		7	83	10		6			0.18
Biral	Modula	25-8 180 RED	25		7	115	10		8			0.18
Biral	Modula	32-4 180 RED	32		7	66	10		4			0.18
Biral	Modula	32-6 180 RED	32		7	102	10		6			0.18
Biral	Modula	32-8 180 RED	32		7	134	10		8			0.18
Biral	Modula	32F-6 220 RED	32		7	102	10		6			0.18
Biral	Modula	40-4 220	40		11	97	10		4			0.18
Biral	PrimaAX	25-3 180 RED	25		2	15	10		3			0.14
Biral	PrimaAX	25-4 180 RED	25		3	19	10		4			0.15
Biral	PrimaAX	25-5 180 RED	25		3	28	10		5			0.16
Biral	PrimaAX	25-6 180 RED	25		3	34	10		6			0.17
Biral	PrimaAX	25-8 180 RED	25		3	50	10		7.5			0.18
Calpeda	NCE EI	15-40/130	15	10.0	3	22	6	2.5	4	1.5	45.7	
Calpeda	NCE EI	15-60/130/A	15	17.8	3	42	6	3.7	6	1.8	42.5	
Calpeda	NCE EI	15-70/130	15	25.9	3	56	6	4.2	7	2.3	46.2	
Calpeda	NCE H	25-40/180	25	26.8	10	60	10	2.5	4	4	44.6	
Calpeda	NCE H	25-60/180	25	42.6	10	90	10	3	6	5.3	47.3	
Calpeda	NCE H	25-80/180	25	67.0	10	140	10	5	8	5	47.8	
Calpeda	NCE PS	20-40/130	20	7.7		20		2.2	4	1.3	38.3	
Calpeda	NCE PS	20-60/130	20	14.6		35		3.4	6	1.6	41.6	
Calpeda	NCE PS	20-80/130	20	22.5		50		4.2	8	2	45.0	
DAB	EVOPLUS	40/180 M				68	16		4.2			0.2
DAB	EVOPLUS	40/180 XM				68	16		4.1			0.2
DAB	EVOPLUS	60/180 M				100	16		6.1			0.2
DAB	EVOPLUS	60/180 XM				100	16		6.1			0.2
DAB	EVOPLUS	80/180 M				130	16		8.2			0.2
DAB	EVOPLUS	80/180 XM				130	16		8.1			0.2
DAB	EVOPLUS	B 40/220.32 M				68	16		4.2			0.2
DAB	EVOPLUS	B 40/250.40 M				70	16		4.2			0.2
DAB	EVOPLUS	B 60/220.32 M				100	16		6.1			0.2
DAB	EVOPLUS	B 60/250.40 M				100	16		6.1			0.2
DAB	EVOPLUS	B 80/220.32 M				132	16		8			0.2
DAB	EVOPLUS	B 80/250.40 M				132	16		8			0.2
DAB	EVOSTA 2	40-70/130 1"				35	10		6.9	3.6		0.18
DAB	EVOSTA 2 SAN	11/139 V				7	10		1.1	0.6		
DAB	EVOSTA 2 SAN	40 -70/150				35	10		6.9	3.6		
DAB	EVOSTA 3	40/130 1"				20	10		4	2.9		0.17
DAB	EVOSTA 4	60/130 1"				35	10		6	3.6		0.18
DAB	EVOSTA 5	80/130 1"				55	10		8	4.2		0.19

2.1. SROVNÁNÍ ELEKTRICKÝCH PŘÍKONŮ VENTILÁTORŮ A ČERPADEL

Výrobce	Řada	Model	DN	Teoretický jmenovitý výkon	Minimální příkon	Max. příkon	PN	Jmenovitá dopravní výška	Maximální dopravní výška	Obj. průtok	Teoretická účinnost	EEl
			mm	W	W	W	bar	m	m	m ³ /hod	%	
Dambat (IBO)	AMG	15-60/130				45	10		6	2.7		
Dambat (IBO)	AMG	25-40/180				22	10		4.5	2.52		
Dambat (IBO)	BETA	25-40/180				22	10		4.5	2.88		
Dambat (IBO)	BETA	25-60/130				45	10		6	3.3		
Dambat (IBO)	MAGI2	MAGI 25-40/180			5	22	10		4	3		0.23
Dambat (IBO)	MAGI3	MAGI 25-60/130			5	45	10		6	3.3		0.23
Dambat (IBO)	MAGI4	MAGI 25-80/180			5	70	10		8	5.4		0.23
Dambat (IBO)	NOVA	20-40/180			5	22	10		4	3		
Dambat (IBO)	NOVA	25-60/180			5	45	10		6	3.3		
Ferro	W0101	15-1.5/85				28	10		1.3	0.7		
Ferro	W0601	25-40/180	25		5	22	10		4.1	2.4		
Ferro	W0602	25-60/180	25		5	45	10		6.2	3		
Ferro	W0603	25-40/130	25		5	22	10		4.1	2.4		
Ferro	W0604	25-60/130	25		5	45	10		6.2	3		
Grundfos	ALPHA SOLAR	15-75 130	25	30.9	2	45	10	3.3	7.5	3.5	68.8	0.2
Grundfos	ALPHA SOLAR	25-75 130	25	30.9	2	45	10	3.3	7.5	3.5	68.8	0.2
Grundfos	ALPHA SOLAR	25-75 180	25	30.9	2	45	10	3.3	7.5	3.5	68.8	0.2
Grundfos	ALPHA1 L	15-40 130	15	8.1	4	25	10	2.01	4	1.5	32.3	0.2
Grundfos	ALPHA1 L	15-60 130	15	15.6	4	45	10	3.01	6	1.94	34.8	0.2
Grundfos	ALPHA1 L	15-65 130	15	17.1	4	60	10	3.3	6.5	1.94	28.6	0.2
Grundfos	ALPHA1 L	20-40 130	20	8.1	4	25	10	2.01	4	1.5	32.3	0.2
Grundfos	ALPHA1 L	20-60 130	20	10.4	4	45	10	2.01	6	1.94	23.2	0.2
Grundfos	ALPHA1 L	25-40 130	25	9.7	4	25	10	2.01	4	1.8	38.8	0.2
Grundfos	ALPHA1 L	25-40 180	25	9.7	4	25	10	2.01	4	1.8	38.8	0.2
Grundfos	ALPHA1 L	25-60 130	25	17.0	4	45	10	3.28	6	1.94	37.9	0.2
Grundfos	ALPHA1 L	25-60 180	25	17.0	4	45	10	3.28	6	1.94	37.9	0.2
Grundfos	ALPHA1 L	25-65 130	25	17.0	4	60	10	3.28	6.5	1.94	28.4	0.2
Grundfos	ALPHA1 L	32-40 180	32	8.1	4	25	10	2.01	4	1.5	32.3	0.2
Grundfos	ALPHA1 L	32-60 180	32	17.0	4	45	10	3.28	6	1.94	37.9	0.2
Grundfos	ALPHA10	15-60 130	15	17.0	3	34	10	3.28	6	1.94	50.1	0.17
Grundfos	ALPHA10	32-60 180	32	17.0	3	34	10	3.28	6	1.94	50.1	0.17
Grundfos	ALPHA11	32-80 180	32	25.2	3	50	10	4.76	8	1.98	50.5	0.18
Grundfos	ALPHA2	15-40 130	15	8.1	3	18	10	2.01	4	1.5	44.9	0.15
Grundfos	ALPHA2 N	25-40 N 180	25	8.1	3	18	10	2.01	4	1.5	44.9	0.15
Grundfos	ALPHA2 N	25-60 N 130	25	17.0	3	34	10	3.28	6	1.94	50.1	0.17
Grundfos	ALPHA2 N	25-80 N 180	25	25.0	3	50	10	4.36	8	2.14	50.0	0.18
Grundfos	ALPHA2 N	32-40 N 180	32	8.1	3	18	10	2.01	4	1.5	44.9	0.15
Grundfos	ALPHA2 N	32-60 N 180	32	17.0	3	34	10	3.28	6	1.94	50.1	0.17
Grundfos	ALPHA2 N	32-80 N 180	32	25.0	3	50	10	4.36	8	2.14	50.0	0.18
Grundfos	ALPHA3	15-40 130	15	8.1	3	18	10	2.01	4	1.5	44.9	0.15
Grundfos	ALPHA3	32-80 180	32	25.0	3	50	10	4.36	8	2.14	50.0	0.18
Grundfos	ALPHA4	15-60 130	15	17.0	3	34	10	3.28	6	1.94	50.1	0.17
Grundfos	ALPHA4	32-60 180	32	17.0	3	34	10	3.28	6	1.94	50.1	0.17
Grundfos	ALPHA5	15-80 130	15	25.0	3	50	10	4.36	8	2.14	50.0	0.18
Grundfos	ALPHA5	32-40 180	32	8.1	3	18	10	2.01	4	1.5	44.9	0.15
Grundfos	ALPHA6	25-40 130	25	8.1	3	18	10	2.01	4	1.5	44.9	0.15
Grundfos	ALPHA6	25-80 180	25	25.0	3	50	10	4.36	8	2.14	50.0	0.18
Grundfos	ALPHA7	25-60 130	25	17.0	3	34	10	3.28	6	1.94	50.1	0.17
Grundfos	ALPHA7	25-60 180	25	17.0	3	34	10	3.28	6	1.94	50.1	0.17
Grundfos	ALPHA8	25-60 130	25	17.0	3	34	10	3.28	6	1.94	50.1	0.17
Grundfos	ALPHA8	25-80 130	25	25.0	3	50	10	4.36	8	2.14	50.0	0.18

2. ELEKTRICKÉ KOMPONENTY KOTLE

Výrobce	Řada	Model	DN	Teoretický jmenovitý výkon	Minimální příkon	Max. příkon	PN	Jmenovitá dopravní výška	Maximální dopravní výška	Obj. průtok	Teoretická účinnost	EEl
			mm	W	W	W	bar	m	m	m ³ /hod	%	
Grundfos	ALPHA9	25-40 180	25	8.1	3	18	10	2.01	4	1.5	44.9	0.15
Grundfos	ALPHA9	32-40 180	32	8.1	3	18	10	2.01	4	1.5	44.9	0.15
Lowara (Xylem)	ecocirc	M 15-6/130				34	10		6	3.4		0.2
Lowara (Xylem)	ecocirc	S 15-4/130				24	10		4	3		0.2
Salus	MP200A		40		5	32	10			2.4		
Wilo	Stratos PICO	15/0,5-4	15	15	3	20	10		4.2	2.9	75.0	0.18
Wilo	Stratos PICO	15/0,5-6	15	30	3	40	10		6.3	3.7	75.0	0.18
Wilo	Stratos PICO	15/0,5-8	15	58	3	75	10		8.1	4.4	77.3	0.23
Wilo	Varios PICO-STG	15/1-13-	15	55	1	75	10		13.6	2.4	73.3	0.23
Wilo	Varios PICO-STG	15/1-7-	15	38	1	50	10		7	3.8	76.0	0.2
Wilo	Varios PICO-STG	15/1-8-	15	55	1	75	10		8.4	4.4	73.3	0.23
Wilo	Wilo-Star-Z	20/1-	20			30	10		1	1.6		
Wilo	Wilo-Star-Z	20/4-3-	20	22.5		71	10		4.7	3.7	31.7	
Wilo	Wilo-Star-Z	20/5-3-	20	38		93	10		4.6	3.3	40.9	
Wilo	Wilo-Star-Z	20/7-3-	20	57		147	10		6	6	38.8	
Wilo	Wilo-Star-Z	25/2 EM	25	30		30	10		2.3	3.6		
Wilo	Wilo-Star-Z	25/6-3-	25	38		99	10		3.4	2.5	38.4	
Wilo	Wilo-Star-ZD	25/6-	25	57		128	10		6.1	9	44.5	
Wilo	Wilo-TOP-Z	20/4 (1~230 V, PN 10, Inox)	20	60		105	10		3.4	3.9	57.1	
Wilo	Wilo-TOP-Z	20/4 (3~400 V, PN 10, Inox)	20	60		100	10		3.6	4	60.0	
Wilo	Yonos PICO1.0	25/1-8-	25	58	4	75	10		7.6	4.4	77.3	0.23
Wilo	Yonos PICO1.1	25/1-5-130	25	25	4	33	10		5.1	3.2	75.8	0.2
Wilo	Yonos PICO1.2	15/1-4-	15	15	4	20	10		4.3	2.7	75.0	0.2
Wilo	Yonos PICO1.3	15/1-6-	15	30	4	40	10		6	3.5	75.0	0.2
Wilo	Yonos PICO-D	30/1-6-	30	30	4	40	10		5.7	3.5	75.0	0.2
Wilo	Yonos PICO-D	30/1-8-	30	58	4	75	10		7.1	4.4	77.3	0.23

2.1. SROVNÁNÍ ELEKTRICKÝCH PŘÍKONŮ VENTILÁTORŮ A ČERPADEL

Tabulka 2.3: Parametry ventilátorů pro domovní kotle

Výrobce	Řada	Model	Typ lopatek	Typ motoru	Označení motoru	Otáčky	Teoretický jmenovitý výkon	Maximální příkon	Jmenovitý celkový tlak	Jmenovitým průtok	Maximální celkový tlak	Maximální průtok	Teoretická účinnost
Blauberg Motoren	BD	B133B-EC-03	BC	DC		4000	10.4	30	250	150		260	34.7
Blauberg Motoren	BD	B175B-EC-00	BC	DC		4000	41.7	95	300	500		750	43.9
Blauberg Motoren	BD	B190B-EC-00	BC	DC		3400	39.6	85	300	475		710	46.6
Blauberg Motoren	BD	B190B-EC-03	BC	DC		4000	62.5	150	300	750		900	41.7
Blauberg Motoren	BD	B220C-EC-00	BC	DC		2700	33.3	95	300	400		1000	35.1
Blauberg Motoren	BD	B220C-EC-01	BC	DC		2700	73.9	150	380	700		1170	49.3
Blauberg Motoren	BD	B225G-EC-00	BC	DC		2700	33.3	85	200	600		960	39.2
Blauberg Motoren	BD	B225G-EC-01	BC	DC		3100	68.9	150	310	800		1250	45.9
Blauberg Motoren	BD	B250B-EC-00	BC	DC		1950	34.4	95	200	620		1150	36.3
Blauberg Motoren	BD	B250B-EC-01	BC	DC		2250	69.4	150	500	500		1350	46.3
Blauberg Motoren	BD	F120B-EC-00	FC	DC		3650	18.8	75	300	225		350	25.0
Blauberg Motoren	BD	F140B-EC-00	FC	DC		1800	25.0	85	300	300		420	29.4
Blauberg Motoren	BD	F160B-EC-01	FC	DC		3000	62.5	150	500	450		620	41.7
Blauberg Motoren	BD	F160C-EC-01	FC	DC		3000	61.1	150	550	400		620	40.7
Blauberg Motoren	BD	F180A-EC-01	FC	DC		2000	55.6	150	500	400		740	37.0
Blauberg Motoren	BL	B133A-EC-00	BC	BLDC		4200	12.4	42	280	160		320	29.6
Blauberg Motoren	BL	B133A-EC-03	BC	BLDC		4780	17.9	62	280	230		380	28.9
Blauberg Motoren	BL	B133B-EC-00	BC	BLDC		4050	10.8	27	260	150		280	40.1
Blauberg Motoren	BL	B133B-EC-01	BC	BLDC		4550	13.7	35	290	170		320	39.1
Blauberg Motoren	BL	B175A-2E-A01-01	BC	AC		2500	13.2	55	125	380		500	24.0
Blauberg Motoren	BL	B175A-2E-A02-01	BC	AC		2700	16.0	56	160	360		520	28.6
Blauberg Motoren	BL	B175A-EC-01	BC	BLDC		3100	23.3	49	200	420		620	47.6
Blauberg Motoren	BL	B175A-EC-03	BC	BLDC		3730	44.2	82	350	455		840	53.9
Blauberg Motoren	BL	B175B-EC-02	BC	BLDC		4400	52.2	115	470	400		670	45.4
Blauberg Motoren	BL	B190A-2E-A02-01	BC	AC		2600	18.5	63	175	380		550	29.3
Blauberg Motoren	BL	B190B-EC-00	BC	BLDC		3300	41.7	87	300	500		760	47.9
Blauberg Motoren	BL	B190B-EC-01	BC	BLDC		3000	26.8	64	230	420		680	41.9
Blauberg Motoren	BL	B190B-EC-02	BC	BLDC		3800	50.7	115	380	480		820	44.1
Blauberg Motoren	BL	B190B-EC-03	BC	BLDC		4100	88.7	170	515	620		1000	52.2
Blauberg Motoren	BL	B190A-2E-A01-01	BC	AC		2700	15.3	61	170	325		600	25.2
Blauberg Motoren	BL	B220B-2E-A01-01	BC	AC		2500	26.7	97	200	480		850	27.5
Blauberg Motoren	BL	B220B-2E-B01-01	BC	AC		2600	27.5	111	220	450		900	24.8
Blauberg Motoren	BL	B220C-EC-00	BC	BLDC		2400	36.7	86	220	600		1000	42.6
Blauberg Motoren	BL	B220C-EC-01	BC	BLDC		3200	74.6	165	410	655		1300	45.2
Blauberg Motoren	BL	B220C-EC-02	BC	BLDC		2800	50.0	115	300	600		1000	43.5
Blauberg Motoren	BL	B220C-EC-05	BC	BLDC		3100	57.8	131	320	650		1050	44.1
Blauberg Motoren	BL	B225C-2E-C01-01	BC	AC		2700	61.4	155	280	790		1400	39.6
Blauberg Motoren	BL	B225D-EC-00	BC	BLDC		2100	39.0	85	195	720		1090	45.9
Blauberg Motoren	BL	B225D-EC-01	BC	BLDC		3800	85.0	165	360	850		1400	51.5
Blauberg Motoren	BL	B225F-2E-C01-01	BC	AC		2500	58.3	130	280	750		1300	44.9
Blauberg Motoren	BL	B225G-2E-C01-01	BC	AC		2700	51.9	145	340	550		1125	35.8
Blauberg Motoren	BL	B225G-EC-00	BC	BLDC		2300	33.3	85	300	400		960	39.2
Blauberg Motoren	BL	B225G-EC-01	BC	BLDC		3100	75.0	170	450	600		1290	44.1
Blauberg Motoren	BL	B225G-EC-02	BC	BLDC		2600	54.2	115	390	500		1120	47.1
Blauberg Motoren	BL	B250B-EC-00	BC	BLDC		1800	41.7	85	200	750		1200	49.0
Blauberg Motoren	BL	B250B-EC-01	BC	BLDC		2800	80.0	162	320	900		1490	49.4
Blauberg Motoren	BL	B250B-EC-02	BC	BLDC		2180	50.0	115	300	600		1200	43.5
Blauberg Motoren	BL	B250C-EC-02	BC	BLDC		2650	116.7	182	280	1500		1710	64.1
Blauberg Motoren	BL	B310B-4E-L01-01	BC	AC		1400	52.5	138	180	1050		2200	38.0

2. ELEKTRICKÉ KOMPONENTY KOTLE

Výrobce	Řada	Model	Typ lopatek	Typ motoru	Označení motoru	Otáčky	Teoretický jmenovitý výkon	Maximální příkon	Jmenovitý celkový tlak	Jmenovitým průtok	Maximální celkový tlak	Maximální průtok	Teoretická účinnost
						rpm	W	W	Pa	m ³ /hod	Pa	m ³ /hod	%
Blauberg Motoren	BL	B310B-EC-04	BC	BLDC		1410	77.9	147	170	1650		2400	53.0
Blauberg Motoren	BL	B310D-EC-07	BC	BLDC		1500	77.8	175	200	1400		2600	44.4
Blauberg Motoren	BL	F108A-EC-00	FC	BLDC		3340	11.0	82	265	150		320	13.5
Blauberg Motoren	BL	F108A-EC-02	FC	BLDC		3700	19.1	115	275	250		400	16.6
Blauberg Motoren	BL	F120A-2E-A01-01	FC	AC		2900	13.9	67	250	200		320	20.7
Blauberg Motoren	BL	F120B-EC-00	FC	BLDC		2800	17.3	86	390	160		330	20.2
Blauberg Motoren	BL	F120B-EC-02	FC	BLDC		3230	20.8	115	250	300		415	18.1
Blauberg Motoren	BL	F133A-EC-00	FC	BLDC		2290	11.7	85	255	165		410	13.8
Blauberg Motoren	BL	F133A-EC-02	FC	BLDC		2530	23.3	115	280	300		500	20.3
Blauberg Motoren	BL	F140A-2E-C01-01	FC	AC		2800	25.8	90	320	290		510	28.6
Blauberg Motoren	BL	F140A-4E-B01-01	FC	AC		1500	5.0	52	95	190		320	9.6
Blauberg Motoren	BL	F140B-EC-02	FC	BLDC		1700	14.4	66	200	260		460	21.9
Blauberg Motoren	BL	F146B-EC-02	FC	BLDC		3070	34.7	115	500	250		490	30.2
Blauberg Motoren	BL	F160A-4E-B01-01	FC	AC		1500	10.4	72	127	295		510	14.5
Blauberg Motoren	BL	F160B-EC-01	FC	BLDC		2200	45.8	170	300	550		740	27.0
Blauberg Motoren	BL	F160B-EC-02	FC	BLDC		1800	44.4	115	400	400		610	38.6
Blauberg Motoren	BL	F160C-EC-00	FC	BLDC		2600	36.9	179	380	350		730	20.6
Blauberg Motoren	BL	F160C-EC-02	FC	BLDC		2080	24.3	115	250	350		550	21.1
Blauberg Motoren	BL	F180A-4E-C01-01	FC	AC		1400	25.4	132	150	610		950	19.3
Blauberg Motoren	BL	F180A-EC-01	FC	BLDC		2040	62.5	170	450	500		750	36.8
Blauberg Motoren	BL	F180A-EC-07	FC	BLDC		2200	77.8	220	400	700		900	35.4
Blauberg Motoren	BL	F180C-EC-00	FC	BLDC		2200	25.3	100	325	280		590	25.3
Blauberg Motoren	BL	F200A-4E-C01-01	FC	AC		1400	20.0	134	160	450		720	14.9
Blauberg Motoren	BL	F200A-EC-07	FC	BLDC		2200	100.0	230	600	600		1000	43.5
Blauberg Motoren	SL	B133A-EC-03	BC	BLDC		4960	20.4	60	490	150		330	34.0
Blauberg Motoren	SL	B133B-EC-00	BC	BLDC		4100	10.0	27	300	120		260	37.0
Blauberg Motoren	SL	B175A-EC-03	BC	BLDC		3810	38.7	83	580	240		570	46.6
Blauberg Motoren	SL	B190B-EC-00	BC	BLDC		3350	31.7	82	570	200		530	38.6
Blauberg Motoren	SL	B190B-EC-14	BC	BLDC		3400	33.3	85	300	400		580	39.2
Blauberg Motoren	SL	F120A-2E-A01-01	FC	AC		2490	5.8	61	190	110		215	9.5
Blauberg Motoren	SL	F120A-2E-A01-11	FC	AC		2720	10.4	72	300	125		260	14.5
Blauberg Motoren	SL	F120B-EC-00	FC	BLDC		2770	10.1	65	280	130		330	15.6
Blauberg Motoren	SL	F120B-EC-10	FC	BLDC		2800	9.5	51	275	125		260	18.7
Blauberg Motoren	SL	F120B-EC-20	FC	BLDC		4100	19.4	85	200	350		410	22.9
Blauberg Motoren	SL	F140A-2E-C01-01	FC	AC		2720	20.0	134	300	240		380	14.9
Blauberg Motoren	SL	F140A-2E-C01-11	FC	AC		2650	29.3	157	320	330		500	18.7
Blauberg Motoren	SL	F140A-2E-C01-21	FC	AC		2770	20.2	133	330	220		405	15.2
Blauberg Motoren	SL	F140B-EC-00	FC	BLDC		2580	22.8	122	390	210		510	18.6
Blauberg Motoren	SL	F140B-EC-08	FC	BLDC		3000	28.3	85	340	300		480	33.3
Blauberg Motoren	SL	F140B-EC-12	FC	BLDC		1940	13.1	64	210	225		420	20.5
Blauberg Motoren	SL	F160A-4E-B01-11	FC	AC		1340	9.3	73	120	280		450	12.8
Blauberg Motoren	SL	F160C-EC-00	FC	BLDC		2400	35.6	170	320	400		700	20.9
Blauberg Motoren	SL	F160C-EC-10	FC	BLDC		2380	40	177	400	360		700	22.6
Casals	MA	18 M2 0,09kW	FC			2800	4.7	90	150	112		180	5.2
Casals	MA	24 M2 0,09kW	FC			2800	18.6	90	371	180		255	20.6
Casals	MA	25 M2 0,18kW	FC			2800	36.7	180	347	381		490	20.4
ebm-papst	G2E	108-AG63 -01	FC	AC	M2E 052-BF	1850	4.2	30	150	100	225	160	13.9
ebm-papst	G2E	120-AR77 -01	FC	AC	M2E 068-BF	2350	10.4	80	250	150	340	255	13.0
ebm-papst	G2E	140-AL40 -01	FC	AC	M2E 068-CF	1650	25.0	135	310	290	400	415	18.5

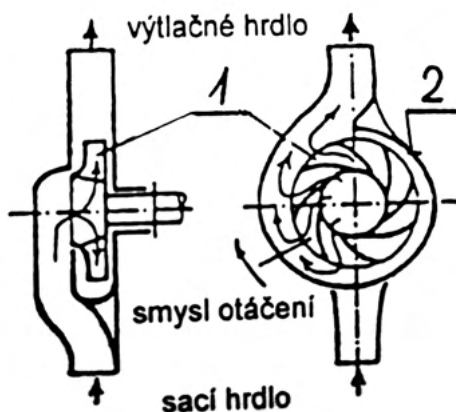
2.2. OBĚHOVÉ ČERPADLO

Výrobce	Řada	Model	Typ lopatek	Typ motoru	Označení motoru	Otáčky	Teoretický jmenovitý výkon	Maximální příkon	Jmenovitý celkový tlak	Jmenovitým průtok	Maximální celkový tlak	Maximální průtok	Teoretická účinnost
						rpm	W	W	Pa	m ³ /hod	Pa	m ³ /hod	%
ebm-papst	G2E	VHS0108XQFFS	FC	AC		2300	5	57	180	100	290	148	8.8
ebm-papst	G2E	VHS0108XQFFZ	FC	AC		1870	4.2	58	150	100	270	144	7.2
ebm-papst	G2E	VHS0108XSHCZ	FC	BLDC		2800	10.4	55	250	150	620	198	18.9
ebm-papst	G2E	VHS0120XQFHZ	FC	AC		2300	6.9	90	200	125	380	184	7.7
ebm-papst	G3G	108-BB01 -02	FC	BLDC	M3G 055-BD	2800	9.7	50	240	145	360	244	19.3
ebm-papst	G3G	120-BB03 -02	FC	BLDC	M3G 055-BD	2200	7.9	41	190	150	300	240	19.3
ebm-papst	G3G	140-AV03 -02	FC	BLDC	M3G 055-CF	1800	16.7	66	200	300	290	425	25.3
ebm-papst	G3G	160-AC50 -01	FC	BLDC	M3G 074-CF	2150	43.8	170	350	450	475	630	25.7
Kovarson		K 117	FC			2100	240				560	600	
Kovarson		VPA 145 KL	FC			2400	160				75	485	
MplusM	WPA	06	FC	AC	R2E 120-AR38-40	2500	11.1	83	250	160	360	255	13.4
MplusM	WPA	07	FC	AC	R2E 120-AR87-37	1650	5.0	34	150	120	280	160	14.7
MplusM	WPA	117	FC	AC	R2E 120-AR87-37	1650	5.6	34	200	100	280	180	16.3
MplusM	WPA	120	FC	AC	R2E 120-AR38-40	2500	12.5	83	250	180	360	285	15.1
MplusM	WPA	130	FC	AC	R2E 140-AE77-C3	1400	16.7	105	200	300	355	380	15.9
MplusM	WPA	135	FC	AC	R2E 140-AI28-05	2400	23.6	160	250	340	450	390	14.8
MplusM	WPA	140	FC	AC	R2E 140-AE77-C3	1400	16.7	105	200	300	355	395	15.9
MplusM	WPA	EC 108 /24V	FC	BLDC	R1G 108-AB17-02	3000	8.7	42	250	125	415	200	20.7
MplusM	WPA	EC 108 /50W	FC	BLDC	R3G 108-AB01-02	2800	9.3	50	240	140	360	245	18.7
MplusM	WPA	EC 108 /75W	FC	BLDC	R3G 108-AB25-09	4200	13.3	75	300	160	500	265	17.8
MplusM	WPA	EC 120	FC	BLDC	R1G 120-AE91-10	2300	5.0	24	120	150	210	205	20.8
MplusM	WPA	EC 145	FC	BLDC	R3G 140-AW05-12	2400	25	67	300	300	460	300	37.3

2.2. Oběhové čerpadlo

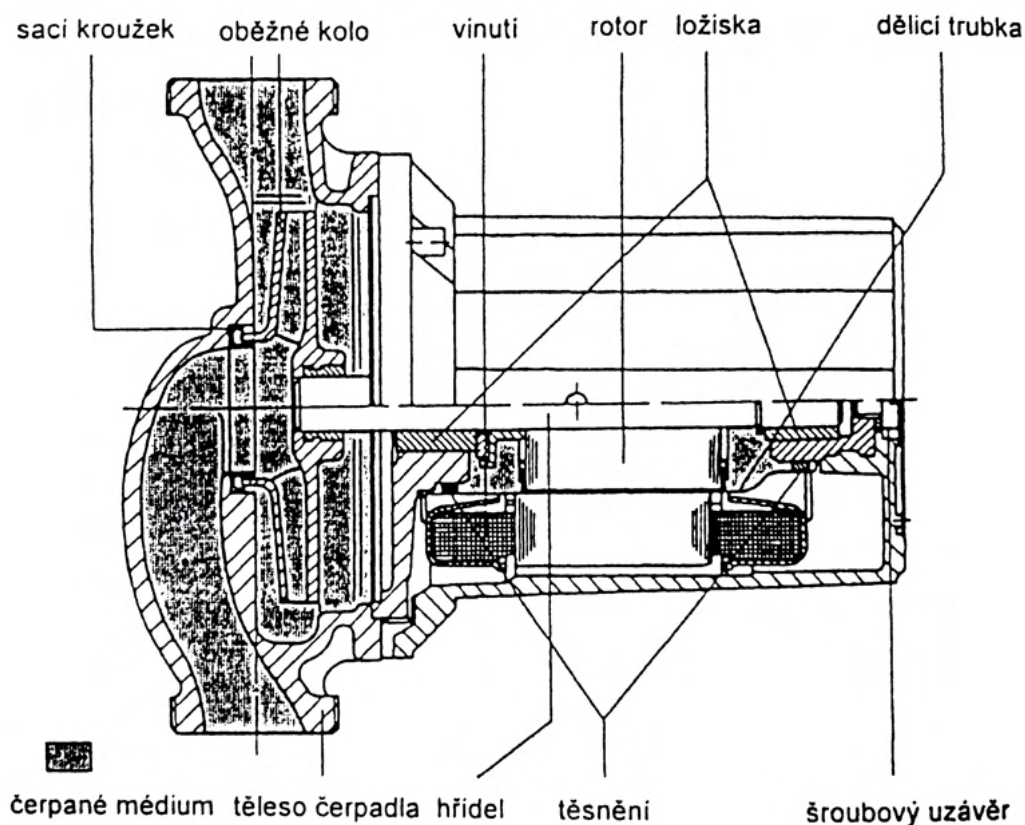
Čerpadla širokou škálu využití ve všech průmyslových oborech. V případě kotlů zajišťují nucenou cirkulaci teplotnosného média, nejčastěji vody, v topném okruhu. Jak plyne z oddílu 2.1, oběhová čerpadla nemají v porovnání s ventilátory příliš vysokou spotřebu. Z tohoto důvodu jsou v této práci zmíněna čerpadla spíše okrajově a hlavní pozornost je věnována ventilátorům.

Z konstrukčního hlediska se v topenářství používají výhradně čerpadla odstředivá. Mezi jejich základní částí patří oběžné kolo, spirální skříň a motor (nejčastěji elektromotor). Nejčastější je kompaktní uspořádání, kdy je motor a oběžné kolo na společné hřídeli. Rotující oběžné kolo zvyšuje pomocí odstředivé síly rychlost a tlak proudu vody. Ve spirální skříni je pak rychlost proudu snížena a tím se ještě zvýší celkový tlak [48].



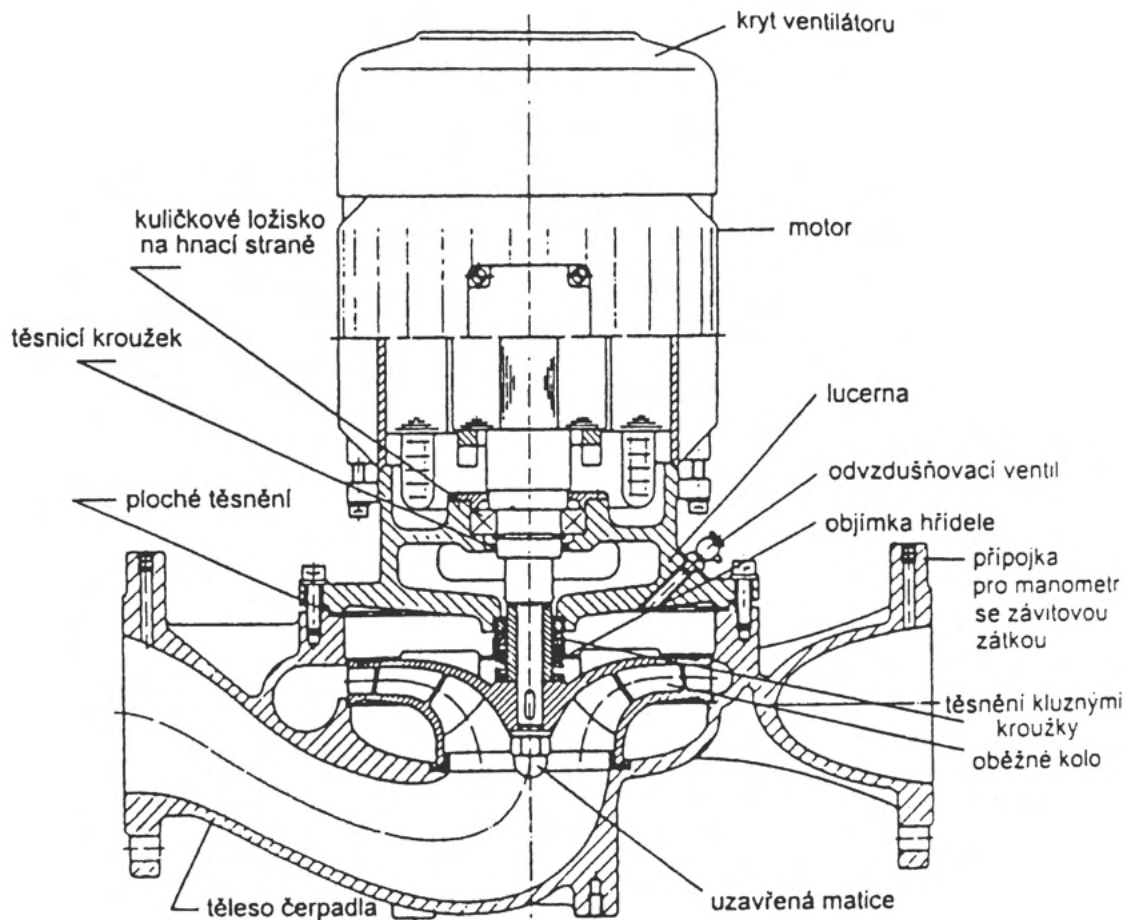
Obrázek 2.4: Základní schéma odstředivého čerpadla. 1: oběžné kolo, 2: spirálnískříň [48].

Oběhová čerpadla jsou dodávány nejčastěji ve dvou provedeních. **Suchoběžná** čerpadla mají oddělenou část pohonnou (motor) od hydraulické části (oběžné kolo s vodou). Motor je chlazen vzduchem často za pomoci ventilátoru, který může být zdrojem hluku. **Mokroběžná** čerpadla mají rotor motoru ponořen, spolu s oběžným kolem v dopravované vodě. Součástí tohoto čerpadla bývají speciální ložiska, která lze chladit vodou (keramická, grafitová). Značnou výhodou je, že motor je chlazen proudem vody a není tak zapotřebí ventilátoru. Z tohoto důvodu se mokroběžná čerpadla využívají častěji.



Obrázek 2.5: Schéma suchoběžného odstředivého čerpadla [48].

2.3. VENTILÁTOR



Obrázek 2.6: Schéma mokroběžného odstředivého čerpadla [48].

Dvěma nejdůležitějšími parametry čerpadla jsou objemový průtok Q [m^3/h] a celkový tlak čerpadla Δp [Pa]. Často se místo celkového tlaku uvádí maximální dopravní výška čerpadla H [m]. Objemový průtok je dán tepelným požadavkem všech otopných těles a celkový tlak je dán tlakovou ztrátou celého potrubního systému. Grafické znázornění závislosti těchto dvou parametrů se nazývá charakteristika čerpadla [48].

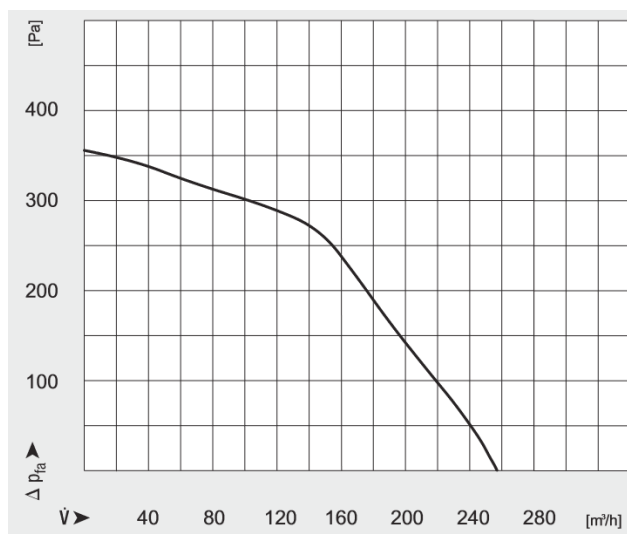
2.3. Ventilátor

Ventilátory jsou nedílnou součástí mnoha technických zařízení, pokud jde o kotle, ventilátory mají za úkol zajistit optimální přísun spalovacího vzduchu a odvod spalin. To má přímý vliv na účinnost vytápění a množství škodlivých emisí.

2.3.1. Teorie, definice a základní pojmy

Ventilátory jsou rotační lopatkové stroje, které jsou určeny ke kontinuální dopravě vzdušnin při malých kompresních poměrech. Hodnota tohoto poměru bývá v rozmezí 1,01 až 1,1, výjimečně se však můžeme setkat i s vyššími kompresními poměry a to až 1,5. V průtočné části ventilátoru je pomocí oběžného kola předávána dopravované vzdušnině mechanické energie, přírůstek této energie je vyjádřen pomocí zvýšení tlaku vzdušiny, toto zvýšení

se nazývá celkový tlak ventilátoru. Pro kompresní poměry menší než 1,03 se zanedbává stlačitelnost vzdušiny a změna tlaku se uvažuje jako izochorická. Dalším z hlavních parametrů ventilátoru je množství dopravované vzdušiny tzn. objemový průtok. Závislost těchto dvou veličin na sobě se nazývá charakteristika ventilátoru viz obr 2.7.



Obrázek 2.7: charakteristika ventilátoru WPA 06 od prodejce MplusM, ventilátor slouží k přívodu spalovacího vzduchu pro domovní kotle. [41]

Pomocí těchto dvou veličin lze stanovit výkon ventilátoru a to ze vztahu

$$P_v = Q_V \cdot \Delta p_{cv} \quad [W] \quad (2.3)$$

kde Q_v [$m^3 s^{-1}$] je objemový průtok ventilátorem a p_{cv} [Pa] je celkový dopravní tlak ventilátoru. Stejně jako v případě ostatních zařízení je účinnost ventilátoru definována jako poměr výkonu ku příkonu, jedná se o tzv. **celkovou činnost ventilátoru** [45]. Pokud je brána v potaz i účinnost motoru tak se už jedná o celkovou účinnost systému.

$$\eta_{cv} = \frac{P_v}{P_{mv}} \quad [-] \quad (2.4)$$

kde příkon P_{mv} [W] je zároveň výkonem pohonu ventilátoru, v tomto případě elektromotoru, ten totiž bývá nejčastějším pohonem ventilátorů.

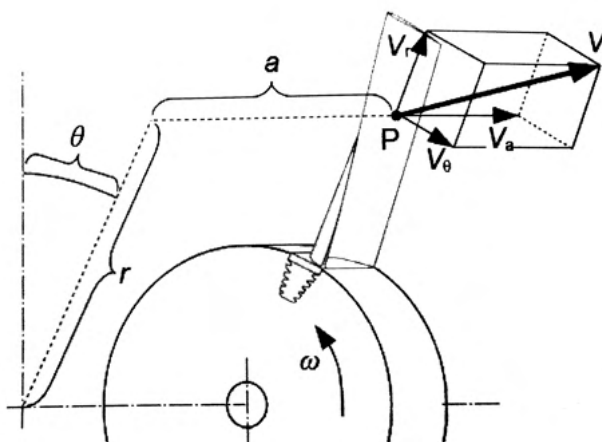
Proudění ve ventilátorech

Tato podkapitola je krátkým úvodem do teorie proudění ve ventilátorech. Zásadní jsou tři rovnice. Rovnice kontinuity popisující množství tekutiny a představující zákon zachování hmotnosti, Bernoulliho rovnice popisující tlak a rychlost tekutiny v daném bodě a pro pohyb se nejjednodušší využívá Eulerova rovnice, při složitých případech je ale na místě využití rovnice Navier-Stokesovy [45, 49, 50]. Tyto rovnice bývají kombinovány pro výpočet různých aspektů proudění tekutin, jako je například rychlost, tlak a průtok tekutiny v daném prostoru.

Při výpočtu ventilátorů hraje klíčovou roli absolutní rychlost proudu tekutiny c (někdy také v , nebo V), ta má průmět do tří směrů v prostoru. Pro výpočet lopatkových strojů je nejvhodnější válcový souřadný systém. Ten je znázorněn na obrázku 2.8, složka rychlosti ve směru rotace se nazývá obvodová u (někdy také θ), složka rychlosti ve směru osy rotace

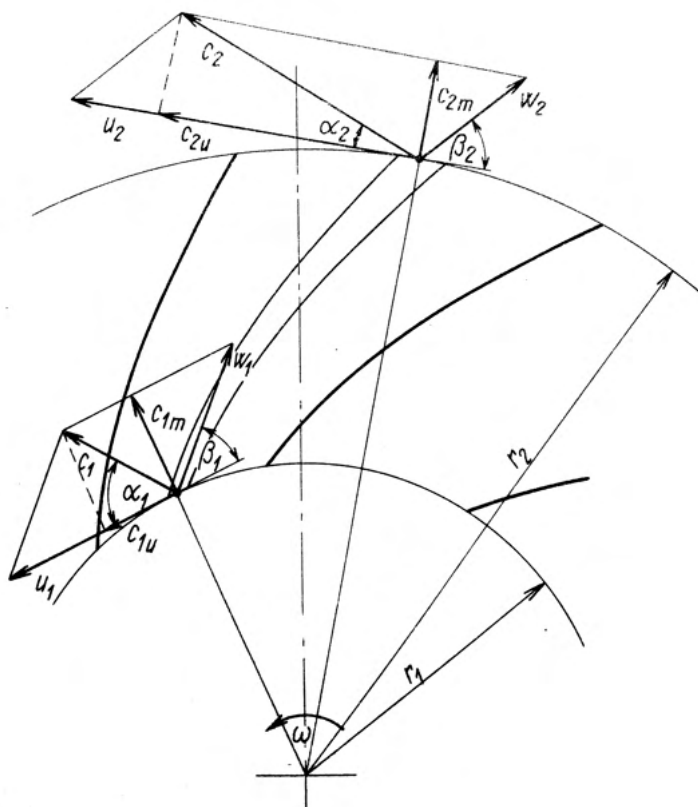
2.3. VENTILÁTOR

se nazývá axiální a a složka rychlosti kolmá na osu otáčení se nazývá radiální m (někdy také r) [49]. Abs. rychlost je tedy vektor $\vec{c}(c_m; c_u; c_a)$, pro přehlednost není v dalším textu uváděna šipka.



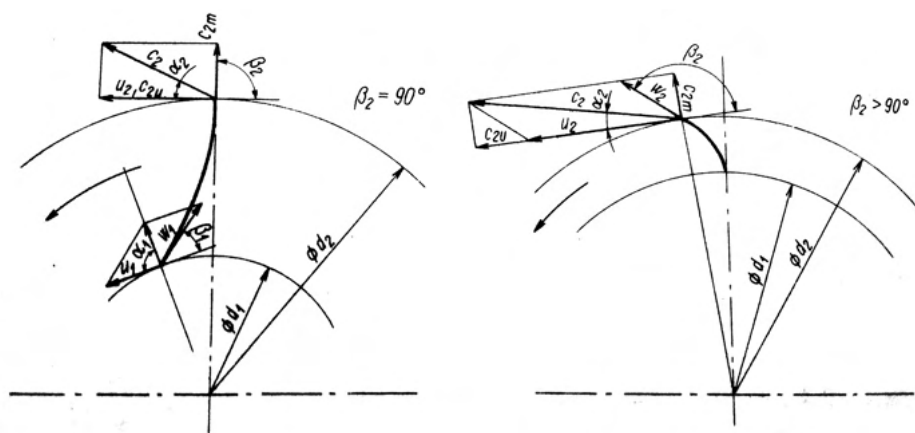
Obrázek 2.8: Složky absolutní rychlosti, P - bod, ve kterém je vyšetřována abs. rychlost V [49]

Absolutní rychlost tekutiny c je vektorovým součtem obvodové rychlosti rotoru u a relativní rychlosti w , ta se dá rozložit analogickým způsobem jako rychlost absolutní. Grafické znázornění těchto rychlostí tvoří tzv. **rychlostní trojúhelník** (viz obr.: 2.9 a 2.11), ten je zcela zásadní při výpočtu a návrhu ventilátorů. Ve znázornění rychlostních trojúhelníků se objevují i dva úhly, α a β , jedná se o úhly odchýlení absolutní a relativní rychlosti od tečny ke kolu. Při návrhu hraje úhel β důležitou roli, popisuje totiž zakřivení proudu tekutiny na oběžném kole.



Obrázek 2.9: Rychlostní trojúhelníky radiálního ventilátoru s dozadu zahnutými lopatkami [45].

Vzhledem k tomu, že absolutní rychlost a tím pádem i některé, či všechny její složky se při průchodu ventilátorem mění, tak je v každém bodě rychlostní trojúhelník jiný. Uvažují se proto jen ty v důležitých částech ventilátoru, což je hlavně vstup do oběžného kola, označovaný indexem 0, vstupu do lopatkové mříže, označovaný indexem 1 a výstupu z lopatkové mříže kola, označovaný indexem 2. Rychlostní trojúhelníky na obrázku 2.9 jsou specifické pro dozadu zahnuté lopatky, jak je uvedeno v následující podkapitole 2.3.2 tak existuje více typů lopatek, všechny mají své charakteristické rychlostní trojúhelníky viz obr.: 2.10.



Obrázek 2.10: Rychlostní trojúhelníky radiálního ventilátoru s radiálně ukončenými (vlevo) a dopředu zahnutými (vpravo) lopatkami [45].

2.3. VENTILÁTOR

Při průchodu ventilátorem je vzdušně předávána energie, velikost tohoto přírůstku je možné vyjádřit pomocí **Bernoulliho rovnice**. Pomocí vztahu 2.5 lze vyjádřit energii E_1 1 kg dopravovaného plynu na vstupu do oběžného kola, obdobně lze vyjádřit i energii na výstupu z kola E_2 (rov. 2.6). Rozdíl těchto hodnot se nazývá měrnou dopravní prací Y viz 2.7. [50]

$$E_1 = \frac{p_1}{\rho} + h_1 \cdot g + \frac{c_1^2}{2} \quad [J/Kg] \quad (2.5)$$

$$E_2 = \frac{p_2}{\rho} + h_2 \cdot g + \frac{c_2^2}{2} \quad [J/Kg] \quad (2.6)$$

kde p [Pa] je statická složka tlaku, h [m] je výška v potrubí (pro vzdušinu bývá často zanedbávána) a c je rychlost proudu vzdušiny.

$$Y = E_2 - E_1 \quad [J/Kg] \quad (2.7)$$

Pokud rovnici 2.5 a 2.6 dosadíme do rovnice 2.7, tak po pravě dostaneme rovnici 2.8 vyjadřující teoretický dopravní tlak ventilátoru, jehož oběžné kolo má nekonečný počet lopatek Δp_t [50].

$$\Delta p_t = (p_2 - p_1) + (h_2 - h_1)g \cdot \rho + (c_2^2 - c_1^2) \frac{\rho}{2} \quad [Pa] \quad (2.8)$$

Reálné kolo má však konečný počet lopatek. To má vždy za následek snížení tlaku ventilátoru, což však není doprovázeno energetickou ztrátou. Ke snížení tlaku totiž dochází pootočením vektoru relativní výstupní rychlosti w_2 [45]. Míru zmenšení teoretického dopravního tlaku vyjadřuje součinitel ε [-] [45, 50].

$$\Delta p_{tz} = \Delta p_t \cdot \varepsilon \quad [Pa] \quad (2.9)$$

kde p_{tz} [Pa] je teoretický tlak ventilátoru při konečném počtu lopatek. Dopravní tlak skutečného ventilátoru lze pak určit z rovnice 2.10, která respektuje navíc tzv. **hydraulickou účinnost** η_h [50].

$$\Delta p_{cv} = \Delta p_{tz} \cdot \eta_h \quad [Pa] \quad (2.10)$$

Vztah mezi změnou aerodynamických parametrů při průtoku oběžným kolem a jeho příkonem určuje **Eulerova Rovnice**. Vyjadřuje okamžitý pohybový stav částice vzdušiny jako účinek všech vnějších sil, které na ni působí [45]. Tuto rovnici lze tedy odvodit z věty o změně hybnosti, takto odvozená rovnice pro proudění v lopatkovém kanále radiálního oběžného kola má tvar 2.11. [45, 50]

$$\Delta p_t = \rho(u_2 \cdot c_{2u} - u_1 \cdot c_{1u}) \quad [Pa] \quad (2.11)$$

kde Δp_t [Pa] je výše zmíněný teoretický tlak ventilátoru pro kolo s nekonečným počtem lopatek, ρ [Kg · m⁻³] je hustota tekutiny a závorka obsahuje složky rychlosti proudu viz 2.9.

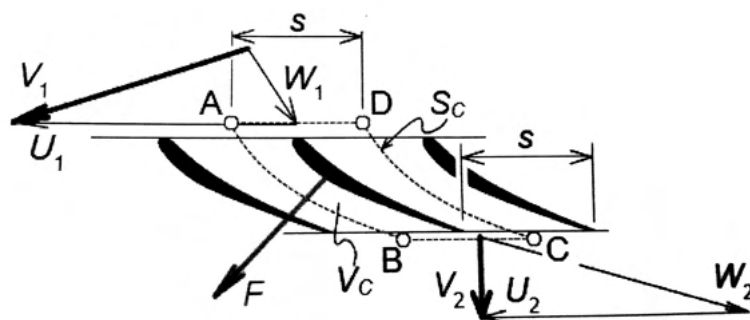
Na základě věty o změně hybnosti lze také vypočítat sílu, kterou působí lopatky ventilátoru na proud vzdušiny, potažmo sílu, kterou působí proud vzdušiny na lopatky ventilátoru. V tomto případě je uvažována změna hybnosti tekutiny v čase jako výslednice

součtu vnějších sil působících na tekutinu v tzv. **kontrolní objemu**. Při vhodné volbě kontrolního objemu tak, aby jeho hranice procházely středem lopatkového kanálu (viz obr.: 2.11) se působení tlakových sil na hranicích AB a DC, díky souměrnosti, navzájem vyruší. Rovnice pro výpočet síly působící na lopatku bude mít pro tento kontrolní objem tvar 2.12. [49]

$$-\vec{F}_b = \vec{F} = \vec{V}_1 \cdot \dot{m} - \vec{V}_2 \cdot \dot{m} + \vec{F}_h + \vec{F}_p \quad [N] \quad (2.12)$$

kde F_b [N] je výslednice sil působících od těles uvnitř a na hranicích kontrolního objemu, F [N] výslednice síly působící na lopatku, V [$m \cdot s^{-1}$] absolutní rychlost tekutiny, \dot{m} [$kg \cdot s^{-1}$] množství pracovní tekutiny protékající kontrolním objemem, F_h [N] tíha tekutiny v kontrolním objemu a F_p [N] výslednice tlakových sil od okolní tekutiny na hranicích kontrolního objemu. Výsledná síla působící na lopatku je kolmá na střední aerodynamickou rychlost v lopatkové mříži w_m . Ta je vypočtena na základě w_1 a w_2 .

$$\vec{w}_m = \frac{1}{2}(\vec{w}_1 + \vec{w}_2) \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (2.13)$$



Obrázek 2.11: Schéma lopatkové mříže s rychlostními trojúhelníky a výslednicí síly působící na lopatku od proudu tekutiny [49].

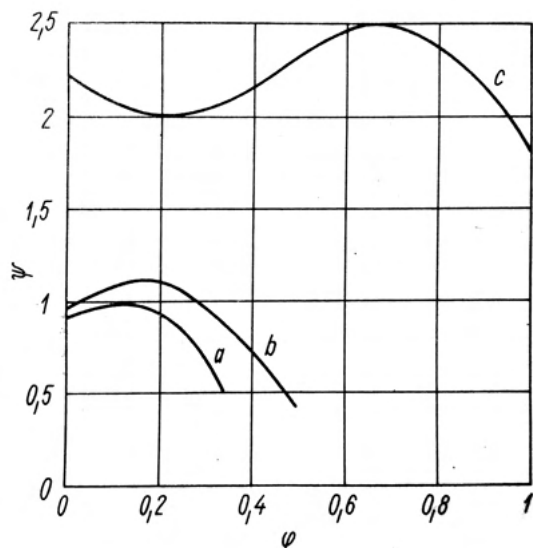
Rychlosti i síly jsou vektorové veličiny, ale šipky nad symboly se v rychlostním trojúhelníku obvykle neuvádějí. F [N] je výslednice síly působící na lopatku, s [m] rozteč lopatkové mříže, W [s^{-1}] relativní rychlost, U [$m \cdot s^{-1}$] obvodová rychlost a V_c [m^3] kontrolní objemu, jehož hranice jsou vymezeny plochou S_c [m^2].

Podobnostní čísla

Rovnice popisující proudění ve ventilátorech jsou sice korektní, pro návrh a výpočet všech parametrů ventilátoru ale zdaleka nestačí. V případě návrhu strojů se velmi často vychází z podobnosti, nejčastěji mechanické a geometrické. Pomocí tzv. podobnostních čísel je pak např. ventilátor navržen na základě podobnosti k již existujícímu. Výpočty ventilátorů bývají často postaveny na podobnostních číslech. Nejdůležitější podobnostní čísla jsou definována pro základní parametry ventilátoru jako jsou průměry kola, otáčky nebo šířka kola. Mezi dvě nejčastěji zmiňované patří **tlakové číslo** a **průtokové číslo**, patří sem však také objemové číslo, či měrné otáčky. [45, 50]

Pokud vykreslíme do grafu závislost průtokového a tlakového čísla pro jednotlivé ventilátory v obvyklých provedeních získáme bezrozměrnou charakteristiku ventilátoru, viz obr. 2.12

2.3. VENTILÁTOR



Obrázek 2.12: Porovnání bezrozměrných charakteristik (závislost tlakového čísla ψ na průtokovém čísle φ) radiálních ventilátorů [45].

Oběžné kolo s a) - dozadu zahnutými, b) - radiálně ukončenými, c) - dopředu zahnutými lopatkami.

2.3.2. Konstrukce ventilátorů

Rozdělení ventilátorů

Existuje několik typů ventilátorů, základní je rozdělení podle směru proudu vzduchu na axiální, radiální, diagonální a diametrální. Dále se ventilátory dají dělit na jednostupňové, nebo vícešupňové, nebo také podle dopravního tlaku na nízkotlaké, středotlaké a vysokotlaké. Podle druhu pohonu se dají rozeznávat ventilátory poháněné elektromotorem, spalovacím motorem, parní, nebo plynovou turbínou atp. Existuje celá řada kritérií a způsobů rozdělení ventilátorů, blíže viz zdroje [45, 50].

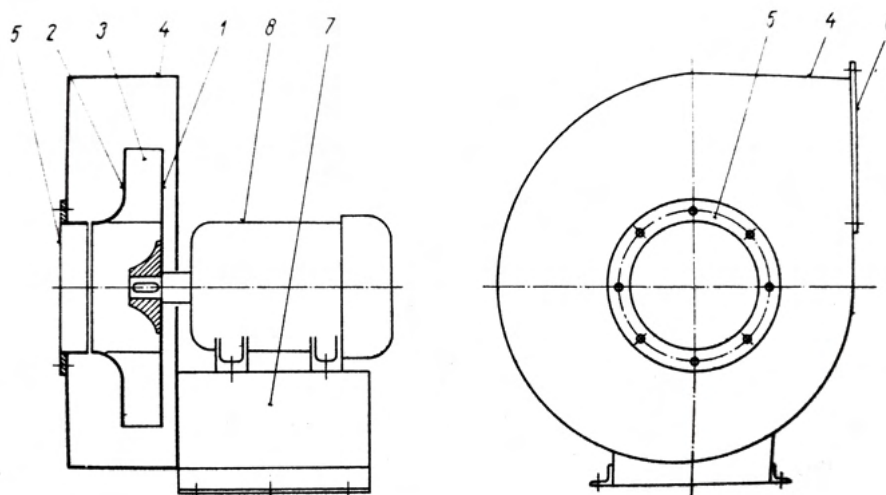
V případě domovních kotlů se zpravidla využívá jednostupňových nízkotlakých radiálních případně axiálních ventilátorů. Axiální a radiální ventilátory se používají především jako přívodní ventilátory pro přísun spalovacího vzduchu, zatímco pro odtah spalin se využívá hlavně těch radiálních. Správný ventilátor pro domovní kotel je klíčový pro zajištění jeho efektivního provozu. Tato práce se věnuje pouze návrhu radiálního ventilátoru. V následujícím textu je tedy věnována pozornost výhradně tomuto typu a ostatní už nejsou uvažovány.

Hlavní části radiálních ventilátorů

Jsou jimi: rotor, spirální skříň, základový rám a pohon, v některých případech bývá součástí radiálního ventilátoru také převodové ústrojí. Rotor je tvořen jedním nebo v případě vícešupňových ventilátorů několika oběžnými koly. Toto kolo je umístěno ve skříni, která je spolu s pohonem uchycena k základovému rámu viz obr 2.14.



Obrázek 2.13: ventilátor WPA 06 od firmy MplusM, ventilátor slouží k přívodu spalovacího vzduchu pro domovní kotle. [41]

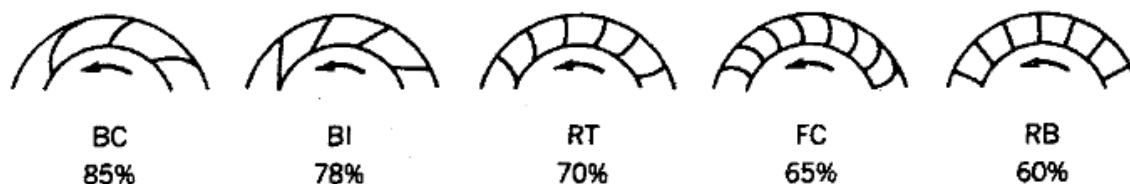


Obrázek 2.14: Schéma radiálního ventilátoru [45]
 1 - nosný kotouč oběžného kola, 2 - krycí kotouč oběžného kola, 3 - lopatky oběžného kola,
 4 - spirální skříň, 5 - sací hrdlo, 6 - výtlačné hrdlo, 7 - základový rám, 8 - motor

Oběžné kolo

Oběžné kolo radiálního ventilátoru se skládá ze tří hlavních částí: nosného kotouče, lopatek a krycího kotouče viz obr.: 2.14. Oběžná kola můžeme dělit podle nejrůznějších kritérií: podle profilu lopatek na lopatky profilované nebo s konstantní tloušťkou, podle celkového tlaku ventilátoru na nízkotlaké, středotlaká a vysokotlaká, podle způsobu pohonu atp. [45]. Nejdůležitější je ale rozdělení podle tvaru oběžných lopatek. Existuje pět základních tvarů lopatek pro oběžná kola viz obr.: 2.15. Tvar lopatek má zcela zásadní vliv na provozní charakteristiky ventilátoru, jeho celkový tvar, velikost a způsob využití.

2.3. VENTILÁTOR



Obrázek 2.15: Základní typy oběžných kol využívaných v radiálních ventilátorech podle tvaru lopatek [46] upraveno.

V prvním řádku je uvedena zkratka typu lopatek vyplývající z anglických názvů, v druhém řádku popisků je pak přibližná maximální hydraulická účinnost, které mohou jednotlivé typy dosáhnout.

BC (backward-curved) - dozadu zahnuté lopatky, tento typ nejvíce připomíná kompresory a čerpadla, což určitě není náhoda. Tyto lopatky mají nejvyšší účinnost, jejich tvar totiž nejlépe kopíruje trajektorii vzdušiny. Využívají se nejčastěji ve středotlakých a vysokotlakých ventilátorech [45].

BI (backward-inclined) - dozadu nakloněné lopatky, jsou velmi podobné těm dozadu zahnutým, díky jedoduššímu tvaru jsou však levnější na výrobu a stále si zachovávají poměrně slušnou účinnost [46].

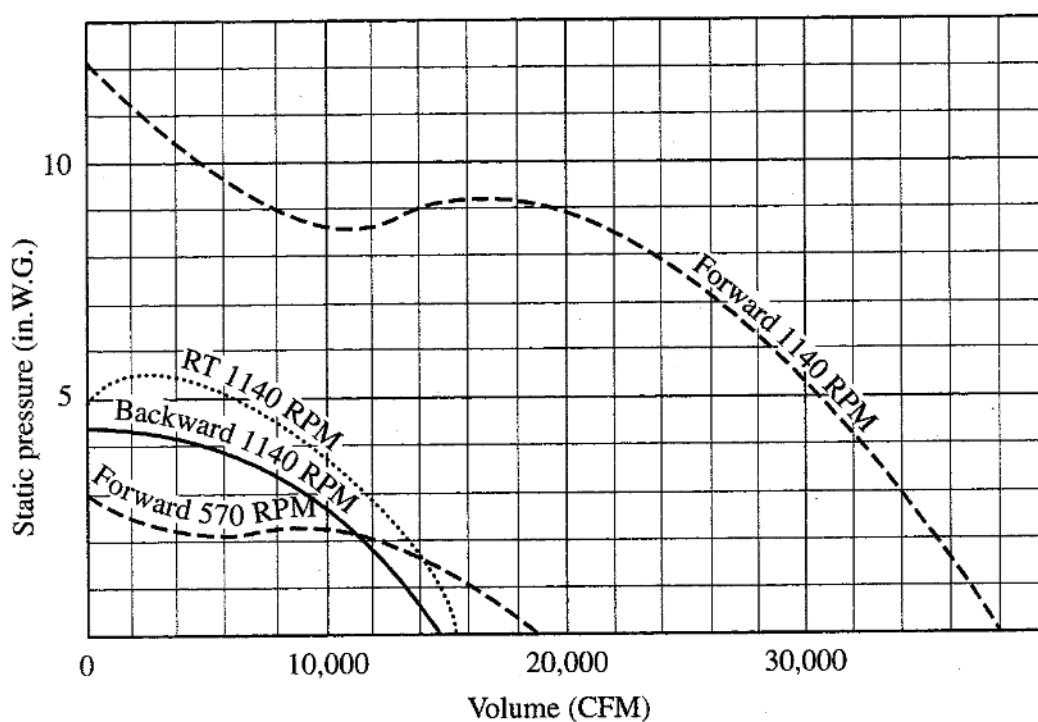
RT (radial-tip) - radiálně zakončené lopatky, používají se převážně ve ventni-látorech určených pro dopravu vzdušiny s vysokou koncentrací lepivých nebo abrazivních částic, odstředivá síla působící na tyto částice totiž svírá s normálou k povrchu lopatky velký úhel a částice tím pádem nemají tendenci ulpívat na povrchu lopatky [45].

FC (forward-curved) - dopředu zahnuté lopatky, oběžná kola s tímto typem lopatek se výrazně liší od všech ostatních. Tyto kola mají menší poměr vnitřního a vnějšího průměru a bývají celkově o dost širší, viz obr.: 2.16. Tvar jejich lopatek se může zdát z pohledu trajektorie proudění nesmyslný, dopředu zahnuté lopatky však pracují jinak než ty dozadu zahnuté. Dopředu zahnuté lopatky prakticky vůbec nezvyšují tlak vzdušiny, ale hlavně její rychlost, tlak je zvýšen až následně ve spirální skříni, kde dojde k výraznému zpomalení proudu a nárůstu tlaku. To má ale za následek výrazné snížení účinnosti. Výhodou těchto ventilátorů je však množství vzduchu které jsou schopny dopravit. Oběžné kolo s dopředu zahnutými lopatkami je při stejné velikosti a otáčkách schopné dopravit až přibližně 2,5 krát větší množství vzdušiny než kola s dozadu zahnutými, nebo radiálně zakončenými lopatkami, to je patrné ze srovnání charakteristik na obr. 2.17 [46].

RB (radial blade) - radiální rovné lopatky, tento typ je zcela nejjednodušší na výrobu ale jeho účinnost je velmi nízká. Oproti ostatním typům má dvě specifické charakteristiky a sice, že nezáleží u něj na směru otáčení a pro jeho funkci nepotřebuje spirální skříň. Kolo tohoto typu se se tedy nejčastěji využívají pro chlazení elektromotorů, kdy je přímo spojeno s hřídelí motoru a uložena v jeho zadní části.



Obrázek 2.16: Srovnání typického oběžného kola s dozadu (vlevo) a dopředu (vpravo) zahnutými lopatkami, výrobcem těchto kol je firma Blauberg motoren [34].



Obrázek 2.17: Srovnání charakteristik oběžných kol s dopředu, dozadu a radiálně ukončenými lopatkami při stejných otáčkách a kola s dopředu zahnutými lopatkami při otáčkách snížených o polovinu. Všechna čtyři kola mají stejný průměr [46].

U větších strojů se obvykle používají lopatky profilované, kde se vyplatí jejich náročná a drahá výroba. Je třeba zmínit, že profilované lopatky se používají jen jako dozadu zahnuté, nebo dozadu nakloněné, u ostatních typů lopatek nemá jejich využití smysl.

Spirální skříň

Spirální skříň se využívá u naprosté většiny ventilátorů, jde o sběrné zařízení proudu vzdušiny. Ve skříni dochází k přeměně části kinetické energie na energii tlakovou, zároveň

2.3. VENTILÁTOR

zde dochází k usměrnění proudu do vhodného místa. Spirální skříň je tedy zakřivený difuzor. Až na výjimky se používají spirální skříně s paralelními stěnami, hlavním důvodem je výrobní cena. Schéma spirální skříně je zobrazeno na obrázku 2.14 a 3.8. [45]

2.3.3. Pohon ventilátorů

Jak je již zmíněno výše, k provozu ventilátorů je využíváno nejrůznějších druhů pohonů, nejčastější jsou využívá elektromotory. Těch existuje celá řada druhů a dělí se podle nejrůznějších kritérií. Pro orientaci je zde uvedeno zjednodušené rozdělení elektromotorů.

Rozdělení motorů

AC

- **Synchronní**
 - **Jednofázový**
 - **Třífázový**
 - **S permanentními magnety (PMSM)** permanent magnet synchronous motor
 - **S elektromagnety**
- **Indukční (Asynchronní)**
 - **Jednofázový**
 - * **Se stíněným pólem (se závitem naktrátko)**
 - * **S kondenzátorem**
 - **S rozběhovým**
 - **S trvale připojeným**
 - **Třífázový** - v průmyslu nejpoužívanější
 - * **Klecový rotor (rotor s kotvou naktrátko)**
 - * **Kroužkový rotor**

DC

- **Synchronní**
 - **Komutátorový**
 - **Univerzální**
 - **EC**
 - * **Bezkartáčový** - BLDC (BrushLessDC)
 - * **Reluktanční** - SMR (synchronous reluctance motor)
 - * **Krokový**

Z tohoto seznamu je nejdůležitější indukční motor, V posledních letech však stále více průmyslových odvětví přechází na využívání EC motorů díky jejich výhodám, jako jsou vysoká účinnost, vysoký výkon, nízká hlučnost, snadná údržba a dlouhá životnost.

Indukční motor

Díky své jednoduchosti, spolehlivosti a s tím souvisejícími nízkými náklady, jsou v dnešní době nejrozšířenější indukční (asynchronní) motory, a to ve všech odvětvích průmyslu. Ve větších provozech, kdy je potřeba velkých výkonů se využívá třífázových asynchronních motorů s kotvou nakrátko.

Ještě jednodušší konstrukci mají motory asynchronní jednofázové, jak již název napovídá pracují pouze s jednou fází, magnetické pole statoru proto nerotuje ale jen pulzuje. Motor se tedy sám nedokáže roztočit a je zapotřebí pomocného vinutí zapojeného přes kondenzátor, využít se dá také tzv. uspořádání se stíněným pólem. Těchto motorů se využívá v aplikacích, kde není potřeba vysokého výkonu a rozhodující je hlavně cena motoru, typickým příkladem je využívání těchto motorů ve ventilátorech.

I přes výhody v jednoduché konstrukci mají jednofázové asynchronní motory značné nedostatky, mezi hlavní patří nízká účinnost, ta se v případě motorků se stíněným pólem pohybuje v mezích 10 až 30 procent [55]. Z tohoto důvodu se jich využívá jen u nejmenších spotřebičů do 20 W. Lepší, i když pořád relativně malé účinnosti dosahují jednofázové motory s kondenzátorem, ta se pohybuje mezi 30 až 50 procenty [56]. Další značnou nevýhodou je několikanásobná hodnota jmenovitého proudu při rozběhu a obecně omezená a často nevhodná možnost regulace [57]. Efektivně lze asynchronní motory řídit pomocí frekvenčního měniče, ten se ale v případě drobných jednofázových motorků nevyplatí.

Jednofázové motory jsou koncipovány pro provoz s málo proměnným zatížením, konstantní frekvencí a efektivní hodnotou napětí. Pokud jsou tyto podmínky dodrženy tak je, v případě kvalitních jednofázových motorů s kondenzátorem, možné dosahovat srovnatelných parametrů (moment, účinnost, hlučnost) jako u třífázových motorů. Při vychýlení napájení z jmenovitého stavu, nebo výrazných výkyvech zatížení se vlastnosti asynchronních motorů výrazně zhoršují, klesá moment, roste odebíraný proud a klesá účinnost [58].

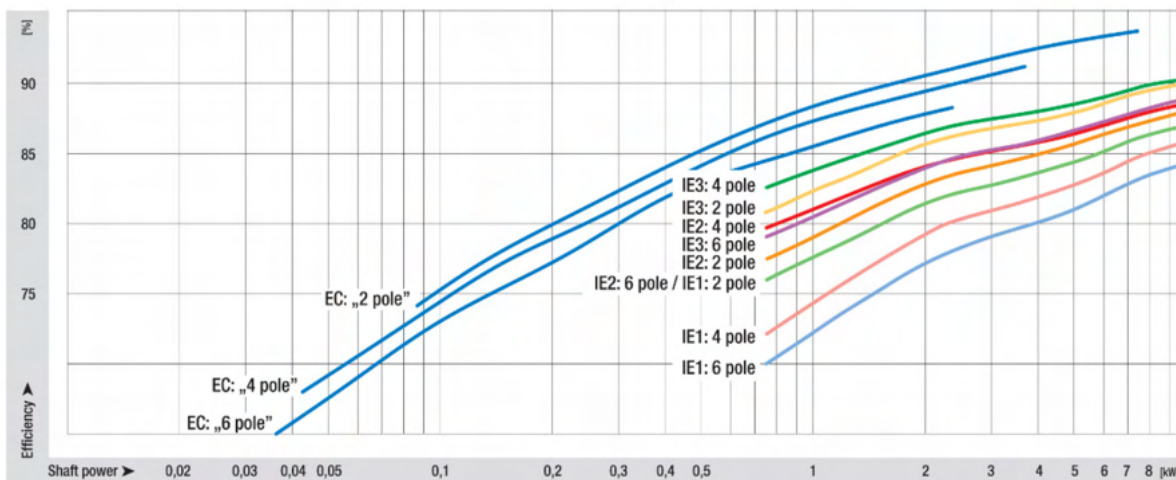
Bezkartáčový motor (BLDC)

Přestože se jedná o stejnosměrný motor, tak je oproti kartáčovému motoru konstrukce opačná, rotor je tvořen permanentními magnety a napájené vinutí je součástí statoru. Klasický mechanický komutátor je zde nahrazen elektronickou řídicí jednotkou, ta přepíná jednotlivá vinutí statoru tak, aby bylo dosaženo optimálního chodu motoru. Komutace tedy probíhá elektronicky, z toho je také odvozený název EC motor (Electronically Commutated motor), který se pro tyto motory často používá. Tento název však není zcela přesný, protože mezi elektronicky komutované motory můžeme zařadit například i tzv. reluktanční motory, jejichž konstrukce je od BLDC motorů značně odlišná.

BLDC motory mají řadu výhod, tou hlavní je bezproblémová regulace otáček, a to s vysokou účinností v celém rozsahu. Zároveň k tomu není zapotřebí dalšího příslušenství jako například frekvenčního měniče, řídicí jednotka totiž bývá součástí motoru. Rozběh je plynulý a není za potřebí vysokých rozběhových proudů. Absence kontaktního komutátoru zaručuje dlouhou životnost s minimálním rizikem přehřívání.

Díky těmto vlastnostem jsou BLDC motory vhodné pro použití ve ventilátorech, a to zejména u těch, které většinu času pracují při snížených parametrech a plného výkonu dosahují jen v určité době, například pouze během skutečně chladných zimních dnů, kdy je kotel v provozu na plný výkon. V tomto případě může být úspora energie při využití EC motorů oproti jednofázovým indukčním obrovská [59].

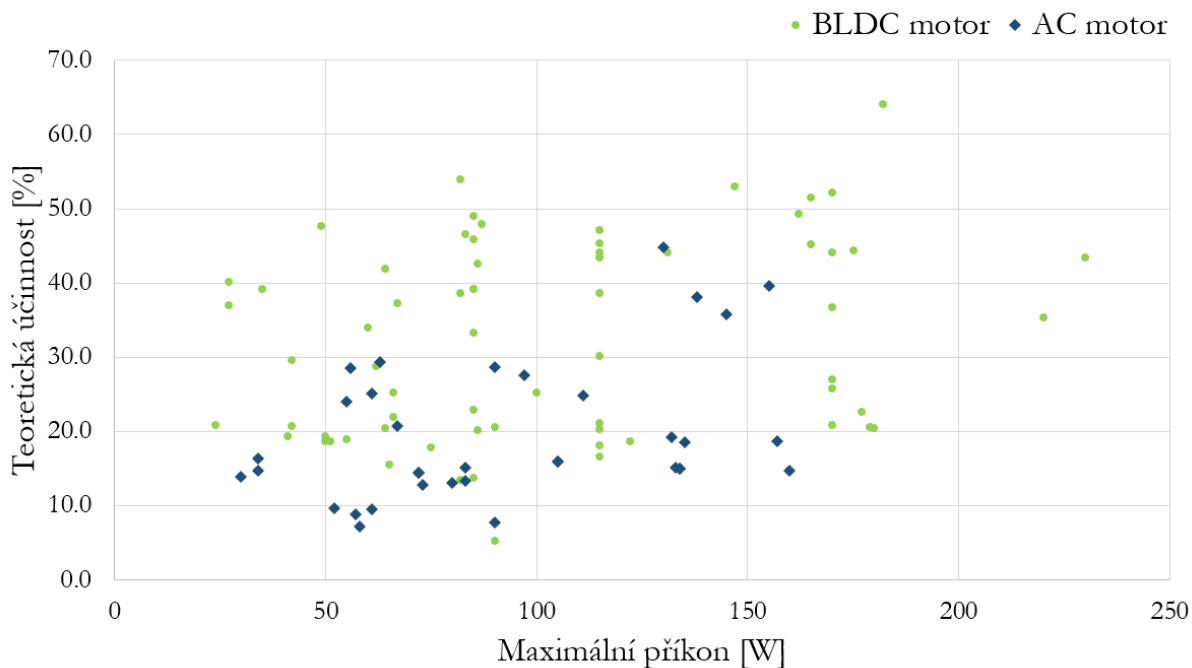
2.3. VENTILÁTOR



Obrázek 2.18: Vysoce účinné BLDC motory (označeny jako EC) s výkonem od 0.1 kW do 10 kW určené pro ventilátory [60].

Srovnání AC a BLDC ve ventilátorech

Dříve bylo ve ventilátorech častěji využíváno AC motorů, ať už s kondenzátorem, nebo v případě menších ventilátorů se stíněným pólem. Dnes však v některých typech aplikací dochází k častějšímu použití bezkartáčových motorů. To platí i v případě ventilátorů. Na trhu působí několik firem, které využívají bezkartáčových motorů při jejich konstrukci, mezi hlavní patří EBM Pabst [38] a Blauberg Motoren [34]. Na jejich produktech je jasné vidět vyšší účinnost ventilátorů s BLDC motory. Tento fakt je znázorněn pomocí grafu na obr. 2.19. Hodnoty, ze kterých čerpá tento graf byly získány v rámci rešerše ventilátorů a čerpadel viz 2.1 a jsou uvedeny v kapitole 2.

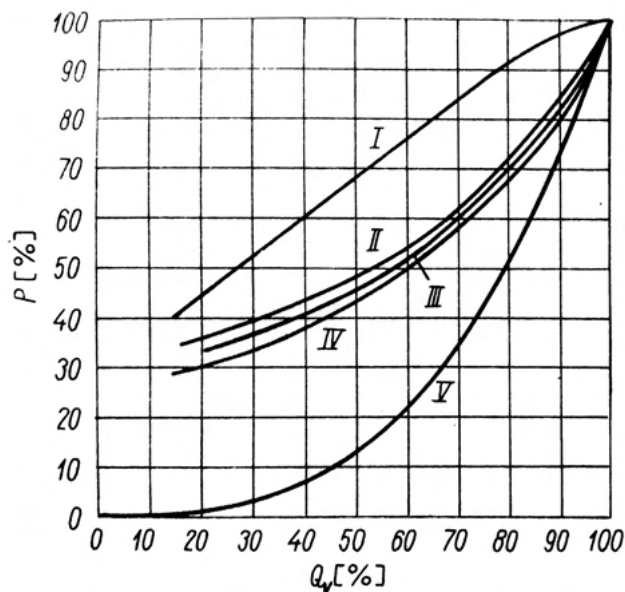


Obrázek 2.19: Srovnání teoretických účinností ventilátorů s AC a BLDC motory v závislosti na jejich maximálním příkonu.

2. ELEKTRICKÉ KOMPONENTY KOTLE

Další velkou výhodou BLDC motorů je účinnější možnost regulace ventilátorů. Ta bývá, v případě AC motorů, často realizována pomocí škrtení, nebo regulační klapkou, motor v tomto případě běží na jmenovité otáčky a regulace je značně neefektivní. Ideální je regulace pomocí otáček oběžného kola ventilátoru, tento způsob je výrazně lepší viz obr.: 2.20. Změny otáček lze dosáhnout pomocí frekvenčního měniče, nebo v případě menších motorků pomocí triakového regulátoru, který je výrazně levnější. Toto je ale součást navíc a zařízení se stává složitějším a jeho celková účinnost může být snížena.

V případě BLDC motorů je regulace otáček daleko jednodušší, řídicí jednotka bývá totiž součástí motoru ale elektronická komutace probíhá v každém případě, její rychlost je tedy jen otázkou řídicího softwaru.



Obrázek 2.20: Porovnání různých způsobů regulace. Křivky udávají závislost potřebného výkonu na průtoku v procentech [45].

I - regulace škrtením, II - pomocí regulačních klapek v sací komoře, III - pomocí polokruhových klapek, IV - osová regulace lopatkami před, V - regulace změnou otáček - ideální stav

3. Optimalizace ventilátoru

Optimalizace obecně znamená hledání té nejlepší varianty, je však potřeba definovat z jakého hlediska má být varianta nejlepší. Optimalizovat produkt lze například z hlediska ceny výroby, rychlosti výroby, míry odolnosti produktu, celkové účinnosti, délky životnosti, úrovně hlasitosti, zastavěného prostoru atp. Prakticky lze najít jakoukoliv vlastnost, kterou pak lze optimalizovat, velmi často jich bývá více dohromady.

Cílem této diplomové práce je optimalizace elektrického napájení tzn. příkonu. To znamená hledání či návrh varianty s co nejmenším příkonem. Toho lze prakticky dosáhnout dvěma způsoby, prvním je výběr či návrh komponent, které nemají zbytečně vysoký výkon pro danou aplikaci a tím druhým je zvýšení celkové účinnosti zařízení. Pozornost je tedy zaměřena výhradně na zvýšení účinnosti, ostatní atributy, jako jsou výrobní cena, odolnost jednotlivých komponent, jejich životnost atp. jsou v případě této práce až druhořadé.

Před samotným návrhem vedoucím k optimalizaci je však třeba vymezit aktuální parametry stávajícího kotle a ventilátoru, na kterém má být optimalizace provedena.

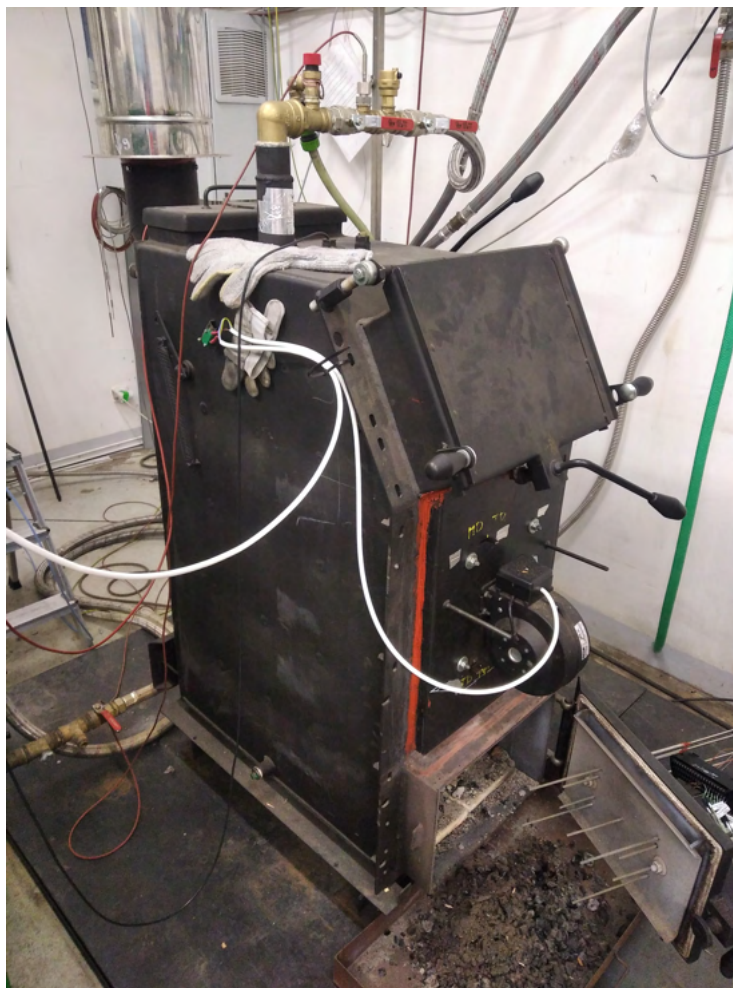
3.1. Stávající parametry

3.1.1. Kotel

Domovní kotel, na kterém je prováděna optimalizace je pokusný kotel určený pro VUT (viz obr.: 3.1), jedná se o mírně upravený kotel řady EkoScroll Delta, výrobcem je Ekogalva s.r.o. [15]. Zcela přesné parametry tohoto kotle nejsou známy, úpravy však nejsou nijak zásadní a na změnu parametrů mají minimální vliv, proto jsou v této práci uvažovány parametry kotle EkoScroll Delta S 25. Celý katalogový list tohoto kotle je možné najít v příloze 1, v následující tabulce 3.1 jsou uvedeny pouze hlavní z parametrů.

Tabulka 3.1: Základní parametry kotle EkoScroll Delta S 25 [15]

parametr	hodnota	
jmenovitý tepelný výkon	24	kW
účinnost	88,5	%
teplota spalin max/min	222/143	$^{\circ}C$
hmotnostní průtok spalin	0,018	$kg \cdot s^{-1}$
palivo	Dřevěná polena a dřevní odpad	
spotřeba paliva (tvrdé dřevo)	5,6	kg/h
minimální doba hoření při jm. výkonu	3,5	h
třída kotle dle EN 303-5	5	
třída energetické účinnosti	A+	



Obrázek 3.1: Upravený kotel EkoScroll Delta S 25.

3.1.2. Ventilátor

Co se týče stávajícího ventilátoru tak se jedná o běžný radiální ventilátor pro přívod spalovacího vzduchu, konkrétně jde o model WPA 06 (viz obr.: 2.13) od polské firmy MplusM [41]. Jedná se o ventilátor s dopředu zahnutými lopatkami poháněný jednofázovým asynchronním motorem s kondenzátorem (viz obr.: 3.2). Celý katalogový list tohoto ventilátoru je možné najít v příloze, 2, v následující tabulce 3.2 jsou uvedeny pouze hlavní z parametrů.

Tabulka 3.2: Základní parametry ventilátoru WPA 06 [41]

typ ventilátoru	WPA 06	
typ motoru	R2E 120-AR38-40	
maximální tlak	360	[Pa]
maximální průtok vzduchu	255	[m ³ /h]
jmenovité otáčky	2500	[ot/min]
příkon	83	[W]

3.1. STÁVAJÍCÍ PARAMETRY



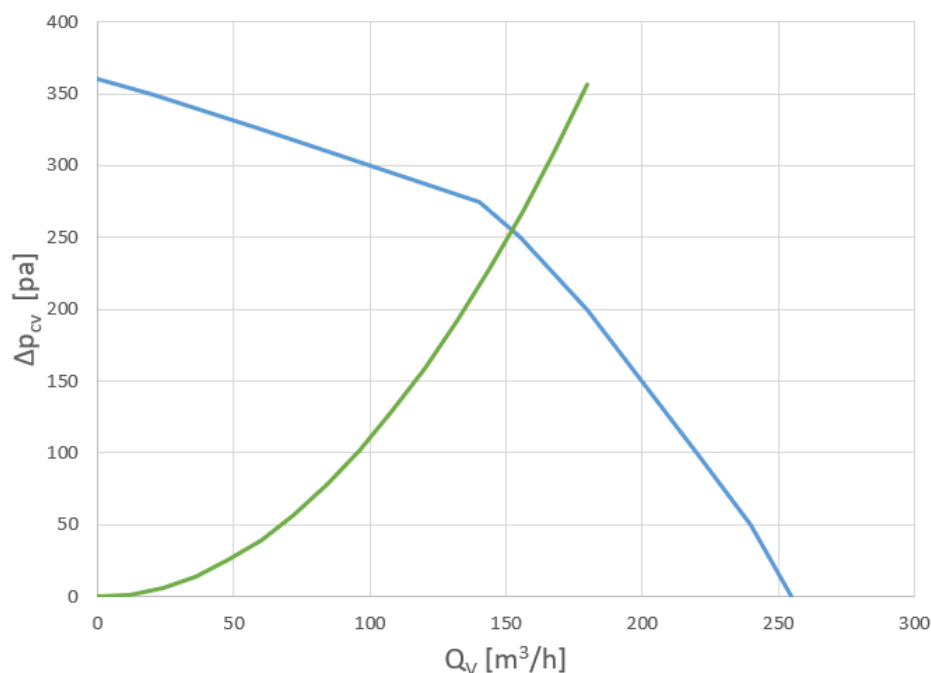
Obrázek 3.2: Oběžné kolo ventilátoru WPA 06 s vestavěným elektromotorem.

3.1.3. Provozní bod

Provozní bod ventilátoru je průsečík mezi charakteristikou ventilátoru a charakteristikou potrubního systému. V tomto bodě bude ventilátor pracovat. Ideální provozní bod je pro ventilátor přibližně mezi 50 až 75 % maximálního průtoku vzduchu [46]. Ventilátoru WPA 06 má tedy ideální provozní při průtoku $Q_V = 125 \div 190 \text{ m}^3/h$. Charakteristika ventilátoru bývá obvykle uváděna výrobcem. Charakteristika potrubního systému, v tomto případě spalovací komory, tahů kotle a komína, ale většinou ne. Přesné určení této charakteristiky je totiž značně složité, do děje totiž vstupuje nejen tvar potrubní trasy, ale i proces hoření, který tuto charakteristiku ovlivní. Toto značně komplikuje výpočet nového ventilátoru. Charakteristika potrubní trasy se dá obecně aproximovat podle rovnice 3.1 [46].

$$\Delta p_k = K \cdot Q_V^2 \quad [Pa] \quad (3.1)$$

kde $p_k [Pa]$ je tlaková ztráta kotle, $Q_v [m^3 s^{-1}]$ objemový průtok a $K [-]$ je konstanta charakterizující systém. Vhodným zvolením této konstanty lze vykreslit aproximovanou potrubní charakteristiku tak aby procházela předpokládaným pracovním bodem ventilátoru viz obr. 3.3.



Obrázek 3.3: Charakteristika původního ventilátoru WPA 06 (modrá křivka) a předpokládaná charakteristika systému (kotle) (zelená křivka).

3.2. Optimalizace účinnosti ventilátoru

V případě ventilátoru lze dosáhnout zvýšení účinnosti návrhem nového co neúčinnějšího oběžného kola se spirální skříní, na základě aerodynamického výpočtu a nahrazením stávajícího pohonu pohonem účinnějším, tzn. výběrem nového, co neúčinnějšího pohonu na základě vypočtených parametrů. Výchozími parametry při výběru motoru jsou v tomto případě jeho výkon P_m a moment síly M , zároveň je třeba vybírat motor s co možná nejvyšší účinností. Jako nejvhodnější varianta byly zvoleny **BLDC motory**. Z důvodů uvedených v kap. 2.3.3, ve zkratce je to hlavně kvůli jejich vysoké účinnosti.

Výchozími parametry při výpočtu ventilátoru je daný průtok Q_v a požadovaný celkový tlak Δp_{cv} [45]. Důležitý je také samozřejmě typ ventilátoru, lopatek atd. V obou případech je však parametrů daleko více a většina z nich je na sobě navzájem závislá. Tím hlavním, jak pro ventilátor tak pro elektromotor, jsou otáčky n , výpočet ventilátoru a parametrů motoru je tedy ideální dělat dohromady.

To se však ukázalo jako značný problém a to hned z několika důvodů. Prvním z nich je skutečnost, že BLDC motory jsou relativně nová technologie, která se dynamicky rozvíjí a její matematický popis není zcela volně přístupný a obecně aplikovatelný, s velkou pravděpodobností se jedná o znalost firem, které na vývoji těchto motorů pracují a snaží se je potom prodat. Některé články se BLDC motory sice obecně popsat snaží, jako příklad lze zmínit článek "An analytical determination of the torque-speed and efficiency-speed characteristics of a BLDC motor" [51]. Charakteristiky vypočtené podle tohoto článku se však výrazně liší od těch co uvádí výrobci. Získání obecných rovnic, které by se dalo dosadit do výpočtu se tím pádem ukázalo jako značně obtížné.

S tím je spojen i druhý důvod, a to že na trhu jsou k dispozici pouze motory s určitými parametry. Pokud by tedy byly parametry motoru jednoznačně stanoveny výpočtem, s

3.3. VÝPOČET OBĚŽNÉHO KOLA

vysokou pravděpodobností by na trhu přesně odpovídající motor nebyl k dispozici. Posledním důvodem je, že při výpočtu ventilátorů lze vycházet z více zdrojů, přistupovat pomocí různých metod a správných řešení bude bezpochyby více. Jedná se tedy z velké části spíše o návrh než přesný výpočet. K problému bylo tedy přistoupeno spíš iteračně.

3.2.1. Postup řešení

V první řadě byl proveden výpočet nového oběžného kola, částečně na základě kola původního, částečně na nově určených parametrech. Cílem bylo stanovit přibližný potřebný výkon a moment síly nového motoru. Na základě těchto dvou parametrů byla provedena rešerše BLDC motorů co jsou k dispozici na trhu, s cílem vybrat co nejúčinnější. V úvahu byly proto brány jejich parametry při nejvyšší účinnosti a ne parametry v jejich návrhovém provozním bodě. Poté byl původní výpočet upraven na základě parametrů vybraných motorů a byl proveden návrh kola tak, aby si parametry motoru a oběžného kola a co nejlépe odpovídaly. Na závěr byly navrženy úpravy skříně, aby odpovídala novému kolu.

3.3. Výpočet oběžného kola

Při návrhu oběžného kola je v první řadě potřeba znát požadovaný průtok a tlakovou ztrátu kotle. Požadovaný průtok lze stanovit na základě stechiometrického množství spalovacího vzduchu. Stanovení tlakové ztráty je ale obtížnější.

Stechiometrický výpočet

Údaje o složení dřeva, na základě kterých byl proveden stechiometrický výpočet jsou uvedeny v tabulce 3.3. Tyto údaje byly převzaty z [52].

Tabulka 3.3: Prvkový rozbor a výhřevnost bukového dřeva v surovém stavu [52]

složka/parametr		hodnota	
uhlík (Carbon)	C^r	42,0	[% $_{hmot}$]
vodík (Hydrogen)	H^r	5,41	[% $_{hmot}$]
kyslík (Oxygen)	O^r	38,5	[% $_{hmot}$]
dušík (Nitrogen)	D^r	0,11	[% $_{hmot}$]
chlór (Chlorine)	Cl^r	<0,01	[% $_{hmot}$]
fluór (Fluorine)	F^r	-	[% $_{hmot}$]
brom (Bromine)	Br^r	-	[% $_{hmot}$]
síra (Sulphur)	S^r	0,01	[% $_{hmot}$]
celový obsah vody	W^r	13,6	[% $_{hmot}$]
celový obsah popeloviny	A^r	0,44	[% $_{hmot}$]
výhřevnost (LHV)	Q_i^r	15,0	[MJ · kg $^{-1}$]

Jako první bylo stanoveno potřebné množství kyslíku pro spálení 1 kilogramu paliva podle rovnice 3.5. Rovnice byla odvozena podle základních chemických rovnic procesu hoření.

$$m_{O_2} = \frac{32}{12} \cdot C^r + 8 \cdot H^r + S^r - O^r \quad [Kg/Kg_{pal}] \quad (3.2)$$

Na základě množství potřebného kyslíku lze stanovit stechiometrické množství potřebného vzduchu na 1 kilogram paliva podle rovnice.:

$$m_{VZD} = \frac{m_{O_2}}{w_{O_2}} \quad [Kg/Kg_{pal}] \quad (3.3)$$

Kde w_{O_2} je hmotnostní podíl kyslíku ve vzduchu, jehož hodnota byla uvažována 23,17 % [53].

Stechiometrické množství vzduchu však nestačí, je zapotřebí uvažovat nějaký přebytek vzduchu α . V rámci této práce byl, na základě odborné konzultace, zvolen přebytek vzduchu $\alpha = 1,8$.

Nyní je zapotřebí vypočtené množství vzduchu na 1 kilogram paliva převést na potřebné množství vzduchu na 1 hodinu provozu kotle při jmenovitém výkonu.:

$$M_{VZD} = \frac{P_k}{Q_i^r} \cdot m_{VZD} \quad [kg/h] \quad (3.4)$$

kde P_k je výkon kotle, η_k je účinnost kotle a Q_i^r výhřevnost paliva.

Posledním krokem je převod kilogramů na metry krychlové podle hustoty vzduchu ρ .

$$V_{VZD} = \frac{M_{VZD}}{\rho} \quad [m^3/h] \quad (3.5)$$

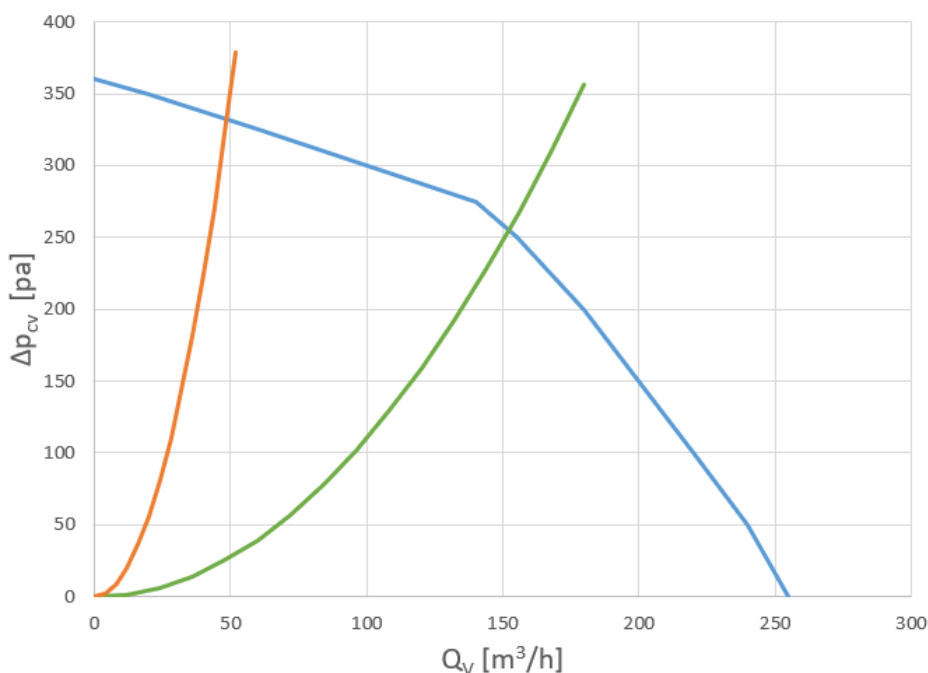
Po dosazení hodnot z tabulek 3.1, 3.3 a při přebytku vzduchu $\alpha = 1,8$ vychází množství spalovacího vzduchu $45,8 m^3/h$. Z důvodů určité rezervy je ve výpočtu oběžného kola uvažována hodnota $60 m^3/h$.

Určení tlakové ztráty

Jak je již zmíněno výše, určení tlakové ztráty kotle může být značně obtížné. Nabízí se ho určit výpočtem, což však značně přesahuje rámec této práce, nebo experimentem, s tím je však spojeno také mnoho komplikací, ať se už jedná o dostupnost měřící techniky, vysoké teploty v komíně, nebo výsledné vyhodnocení dat. Proto byla zvoleno určení tlakové ztráty odečtením z charakteristiky stávajícího ventilátoru.

Výsledek stechiometrického množství vzduchu je zajímavý ve srovnání se stávajícím ventilátorem. Může to totiž znamenat, že ventilátor WPA 06 pracoval výrazně mimo svůj ideální provozní bod a tím pádem by se lépe hodil jiný ventilátor. To by znamenalo, že provozní bod je v oblasti vyšších tlaků a celkově charakteristika systému je posunutá a výrazně strmější viz obr 3.4 (oranžová křivka). Také to ale může znamenat, že ventilátor WPA 06 pracoval v oblasti svého ideálního provozního bodu a tím pádem dopravoval více než trojnásobné množství vzduchu. Skutečnost bude pravděpodobně někde mezi těmito dvěma extrémy. Na základě toho byla hodnota tlakové ztráty odhadnuta na $280 Pa$.

3.3. VÝPOČET OBĚŽNÉHO KOLA

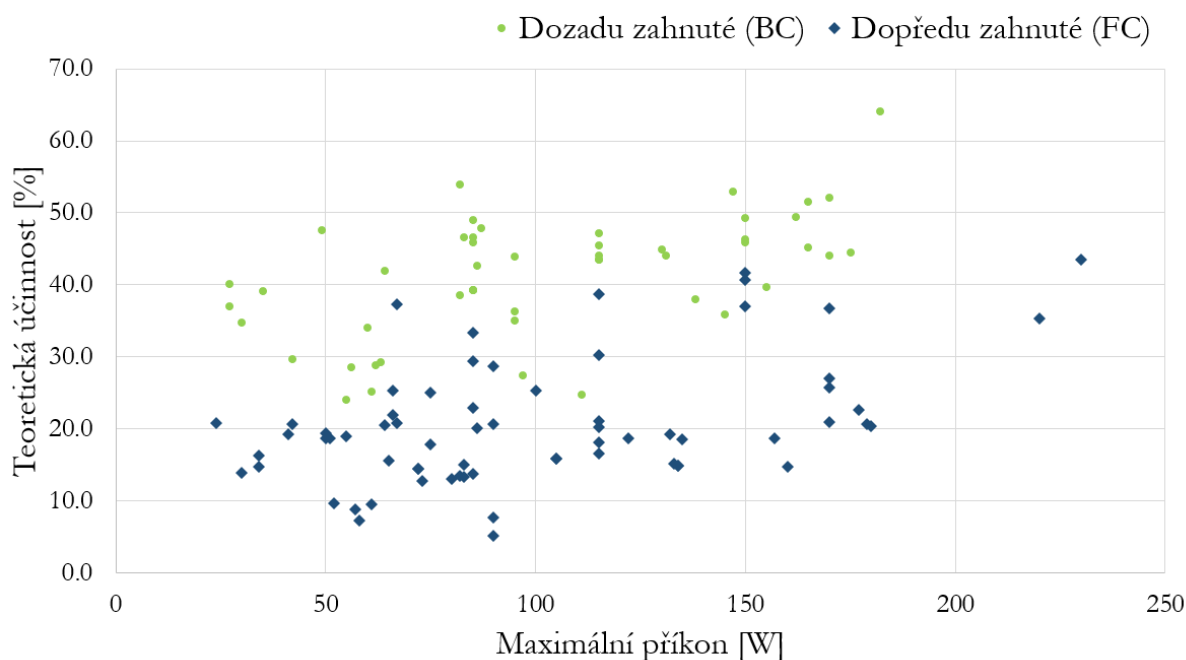


Obrázek 3.4: Charakteristika původního ventilátoru WPA 06 (modrá křivka) a předpokládané charakteristiky systému (kotle) (zelená a oranžová křivka).

3.3.1. Výběr vhodného typu kola

Před samotným výpočtem je třeba určit typ lopatek, který se nejlépe hodí pro danou aplikaci. Z pěti základních typů lopatek (viz kap. 2.3.2) lze vyloučit radiální rovné, využívají se v elektromotorech a mají nízkou účinnost, radiálně zakončené, těch se využívá v agresivních prostředích a dozadu nakloněné, ty jsou jen levnější a méně účinná verze dozadu zahnutých. Na výběr tedy zůstávají dozadu a dopředu zahnuté. Nejběžněji se pro dopravu vzdušín využívá kol s dopředu zahnutými lopatkami, z důvodů popsaných v kap. 2.3.2. Tento typ kol má však z podstaty konstrukce relativně nízkou hydraulickou účinnost.

Pro návrh nového ventilátoru byly zvoleny **dozadu zahnuté lopatky** a to hned z několika důvodů. Hlavním důvodem je účinnost, dozadu zahnuté lopatky mohou mít oproti těm dopředu zahnutým až o 20 % vyšší účinnost [46]. Tato skutečnost je uvedena nejen v [46], ale vyplývá také z grafu na obr. 3.5, kde jsou srovnány účinnosti dopředu a dozadu zahnutých lopatek. Hodnoty, ze kterých čerpá tento graf byly získány v rámci rešerše ventilátorů a čerpadel viz 2.1 a jsou uvedeny v kapitole 2. Druhým zásadním důvodem je zvolený typ pohonu, malé BLDC motory pracují spíše s vyššími otáčkami, nebo mají při vyšších otáčkách vyšší účinnost, tomuto se blíže věnuje následující oddíl 3.4. Vyšší otáčky se lépe hodí pro kola s dozadu zahnutými lopatkami, jak se píše v 2.3.2. Jedním z posledních důvodů je stechiometrické množství spalovacího vzduchu, které vychází výrazně menší, než na jaké byl koncipován původní ventilátor. Ventilátory s dopředu zahnutými lopatkami jsou vhodné pro dopravu velkých objemů vzdušiny, pokud však tolik vzdušiny není potřeba tak jsou dozadu zahnuté lopatky dostačující. V neposlední řadě jde také o výrobu kola, k výrobě byl zvolen 3D tisk. Oběžná kola s dozadu zahnutými lopatkami mají výrazně méně lopatek, které jsou zároveň robustnější a pro výrobu 3D tiskem vhodnější, tomuto se blíže věnuje následující kapitola 4.



Obrázek 3.5: Srovnání teoretických účinností ventilátorů s dopředu a dozadu zahnutými lopatkami v závislosti na jejich maximálním příkonu.

Dále je třeba vybrat tvar dozadu zahnutých lopatek, těchto tvarů se využívá hned několik. Nejčastěji se používají lopatky se střednicí ve tvaru kruhového oblouku nebo logaritmické spirály, lze však zvolit i jiné tvary například parabolický, exponenciální atd [45]. Pro tento návrh byl zvolen, jako tvar střednice lopatek, kruhový oblouk.

Samotný výpočet a návrh kola byl poté proveden dvěma způsoby. Navrženy byly tedy dvě varianty oběžného kola, **varianta A** podle [45] a [46] **varianta B** podle [46]. Tyto dvě varianty byly následně porovnány a byla vybrána vhodnější z nich.

3.3.2. Varianta A

Výchozími parametry výpočtu podle [45] jsou kromě průtoku Q_V [$m^3 \cdot s^{-1}$] a celkového tlaku p_{cv} [Pa] také otáčky (frekvence otáčení) n [s^{-1}]. Jako první je vypočten průtokový součinitel φ a tlakový součinitel ψ , ze vzorců 3.7 a 3.6. K výpočtu těchto dvou součinitelů je zapotřebí znát obvodovou rychlost kola u_2 , pokud jsou dané otáčky tak je třeba zvolit vnější průměr oběžného kola d_2 [m]

$$\varphi = \frac{Q_V}{\frac{\pi^2}{4} d_2^3 \cdot n} \quad [-] \quad (3.6)$$

$$\psi = \frac{\Delta p_{cv}}{\frac{\pi^2}{2} \rho \cdot d_2^2 \cdot n^2} \quad [-] \quad (3.7)$$

kde ρ $kg \cdot m^{-3}$ je hustota dopravované vzdušiny. Pak je třeba určit vnitřní průměr d_1 [m], ten je určen na základě tzv. optimálního poměru průměrů $\left(\frac{d_1}{d_2}\right)_{opt}$. Optimální poměr průměrů lze vypočíst ze vzorce 3.8. Vnitřní průměr kola spolu s dalšími rozměry lze pěkně vidět na obr 3.7.

3.3. VÝPOČET OBĚŽNÉHO KOLA

$$\left(\frac{d_1}{d_2}\right)_{opt} = 1,12\sqrt[3]{c_k \cdot \varphi} \quad [-] \quad (3.8)$$

kde c_k je součinitel konfuzornosti proudu, který určuje zúžení proudu při vstupu do ventilátoru, ten je třeba zvolit. Pomocí optimálního poměru průměrů lze vypočítat vnitřní průměr d_1 [m].

$$d_1 = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)_{opt} \cdot d_2 \quad [m] \quad (3.9)$$

Nyní je třeba vypočítat teoretické tlakové číslo podle vzorce 3.11, k tomu je třeba odhadnout hydraulickou účinnost η_h a určit součinitel zmenšení teoretického tlaku ventilátoru ε podle rovnice 3.10.

$$\frac{1}{\varepsilon} = 0,5 + \frac{1,5 + 2,7\frac{\beta_2}{90^\circ}}{6 \left[1 - \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2\right]} \quad [-] \quad (3.10)$$

$$\psi_t = \frac{\psi}{\eta_h \cdot \varepsilon} \quad [-] \quad (3.11)$$

Dále je na základě odvodové rychlosti u_2 stanovena obvodová složka absolutní rychlosti na výstupu z oběžného kola c_{2u} podle 3.12.

$$\psi_t = 2\frac{c_{2u}}{u_2} \quad [-] \quad (3.12)$$

Dalším krokem je stanovení šířky oběžného kola na vstupu b_1 [m] podle 3.13 a podle toho i absolutní rychlost na vstupu do kola c_1 podle 3.14.

$$b_1 = \frac{d_0}{4c_k} \quad [m] \quad (3.13)$$

kde d_0 [m] je průměr sacího ústí na vstupu do ventilátoru, ten je v tomto případě roven vnitřnímu průměru kola d_1 [m].

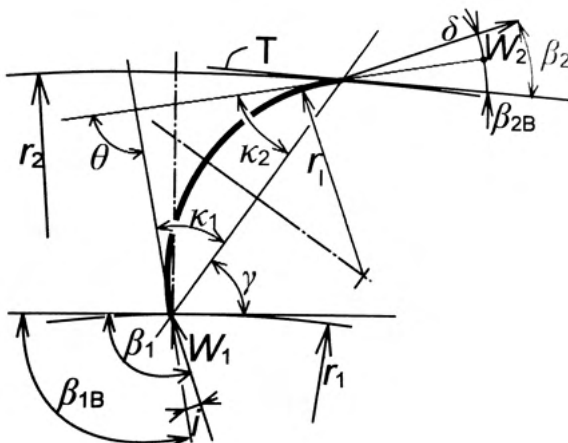
$$c_1 = \frac{Q_V}{\pi d_1 b_1} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (3.14)$$

Poté je třeba zkontrolovat vstupní úhel rychlosti β_1 , ten by se měl přibližně rovnat 35° , pokud ne tak je mírně upravena šířka oběžného kola b_1 dokud $\beta_1 \approx 35^\circ$. Nyní je třeba navrhnout úhel β_2 . Pro dozadu zahnuté lopatky z definice platí $\beta_2 < 90^\circ$, obecně lze také říci že čím menší úhel β_2 tím vyšší účinnost a čím větší úhel β_2 tím vyšší průtok, to však platí jen do jisté míry [46]. Z rychlostního trojúhelníku, kde je známa rychlost c_{2u} , obvodová rychlost u_2 a výstupní úhel β_2 , je určena radiální složka absolutní rychlosti c_{2m} . Ta je následně využita pro výpočet šířky oběžného kola na výstupu b_2 [m] podle 3.15.

$$b_2 = \frac{Q_V}{\pi d_2 c_{2m}} \quad [m] \quad (3.15)$$

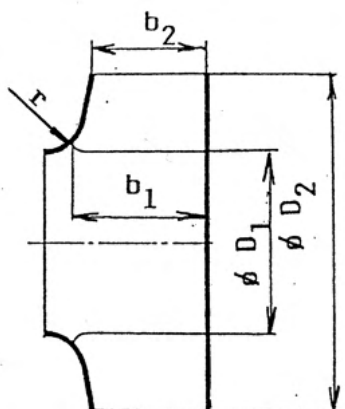
Umístění všech navržených rychlostí a úhlů lze vidět na obr. 2.9, případně na 2.10. Úhly β_1 a β_2 jsou návrhové úhly pro proud vzdušiny. Pro konstrukci oběžného kola ventilátoru je třeba ještě určit úhly lopatek β_{1B} a β_{2B} . Ty se mírně liší o tzv. úhel náběhu i a úhel

deviační δ , přičemž $\beta_{B1} = \beta_1 - i$ a $\beta_{B2} = \beta_2 - \delta$ viz obr. 3.6. Náběhový a deviační úhel se obvykle navrhují relativně malé, přibližně 2 až 3 stupně. [49]



Obrázek 3.6: Schéma lopatky [49].

β_{B1} [°] vstupní úhel lopatky profilu, β_{B2} [°] výstupní úhel lopatky profilu, i [°] úhel náběhu, δ [°] úhel deviační, W_1 [$m \cdot s^{-1}$] relativní rychlost na vstupu, W_2 [$m \cdot s^{-1}$] relativní rychlost na výstupu.



Obrázek 3.7: Schéma oběžného kola se zakótovanými hlavními rozměry [50].

Spirální skříň

Jako první je třeba určit rychlost ve spirální skříni, ta je vypočtena ze vztahu 3.16.

$$\frac{c_{sp}}{c_{2u}} = 0,6 \div 0,75 \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (3.16)$$

Pomocí vztahu 3.17 je určeno rozevření spirální skříně a_{sp} při daném objemovém průtoku Q_V .

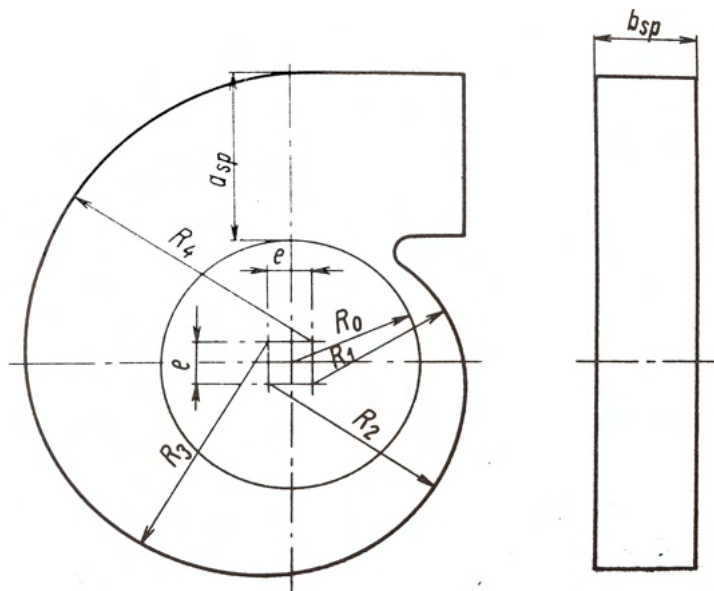
$$a_{sp} \cdot b_{sp} = \frac{Q_V}{c_{sp}} \quad [m] \quad (3.17)$$

kde b_{sp} je šířka spirální skříně, ta bývá většinou vhodně zvolena na základě šířky oběžného kola b .

3.3. VÝPOČET OBĚŽNÉHO KOLA

Ideálním tvarem skříně je logaritmická spirála, ta se však obvykle nahrazuje čtyřmi kruhovými oblouky, viz obr. 3.8. Rozměr e je stanoven vztahem 3.18.

$$e = \frac{a_{sp}}{4} \quad [m] \quad (3.18)$$



Obrázek 3.8: Schéma rozměrů spirální skříně s aproximací logaritmické spirály kruhovými oblouky [45].

Poslední částí výpočtu je ověření původního odhadu hydraulické účinnosti, její zcela přesný výpočet není, vzhledem k značnému množství ne zcela přesných koeficientů, možný. Aproximovat lze však podle vztahu 3.19.

$$\eta_h = \frac{\Delta p_t - \sum_{i=1}^7 \Delta p_{zi}}{\Delta p_t} \quad [-] \quad (3.19)$$

kde Δp_t [pa] je teoretický tlak ventilátoru, který je možné určit z rovnice 2.11, Δp_{zi} [pa] jsou jednotlivé tlakové ztráty v určitých částech ventilátoru, vzorce pro jejich výpočet tu nejsou, z důvodů přehlednosti, uvedeny. Vzorce jsou uvedeny v knize *Ventilátory* na stranách 121 a 122 [45]. Liší-li se předem odhadnutá hodnota od vypočtené, je výpočet proveden znovu s upravenou hodnotou účinnosti η_h .

Parametry pro výběr motoru

Nyní lze určit výkon elektromotoru pomocí 3.20 a moment síly elektromotoru, na základě sil působících na lopatky od proudu vzdušiny.

$$P_m = (1,15 \div 1,2) \frac{Q_V \cdot \Delta p_{cv}}{\eta_{cv}} \quad [W] \quad (3.20)$$

Vzhledem k tomu, že oběžné kolo bude přímo napojeno na osu motoru a nebude v kontaktu s žádnými dalšími komponenty, například ložisky, bude celková účinnost téměř odpovídat té hydraulické, do vzorce je tedy dosazena η_h . Síla působící na lopatky je určena z Eulerovy rovnice, není třeba uvažovat všechny její složky, k výpočtu momentu síly stačí

pouze její obvodová složka F_u , zároveň také není třeba uvažovat vliv tíhových sil F_h a pro obvodovou složku ani těch tlakových F_p . Na základě těchto závěrů lze rovnici 2.12 upravit na tvar 3.21. [49].

$$F_u = \frac{c_{2u} \cdot Q_V}{Z} \quad [N] \quad (3.21)$$

kde Z [-] je počet lopatek. K výpočtu momentu síly je třeba znát ještě rameno síly, v tomto případě je uvažována polovina vnějšího průměru kola d_2 . Tzv. aerodynamický moment síly M_{ap} lze pak vyjádřit jako 3.22.

$$M_{ap} = c_{2u} \cdot Q_V \frac{d_2}{2} \quad [Nm] \quad (3.22)$$

Tento moment působí jen při rovnoměrném pohybu kola. Při jeho rozběhu z klidové polohy je M_{ap} roven 0 Nm a pak postupně narůstá s rychlostí kola. Proti motoru však během rozběhu působí moment setrvačnosti kola. Vzhledem k tomu, že kolo není nutné dostat na jmenovité otáčky v krátkém časovém úseku a jeho hmotnost je relativně nízká je moment setrvačnosti ve výpočtu zanedbán a při výběru motoru je k této skutečnosti přihlédnuto.

Výsledky varianty A

V následujících tabulkách nejsou zobrazeny všechny výsledky výpočtu, to je v rámci tohoto oddílu bezpředmětné, důležité je stanovení výkonu a potřebného momentu síly elektromotoru, který bude vybrán v následující části práce viz 3.4. V tab. 3.4 jsou zobrazeny výchozí hodnoty pro návrh oběžného kola a v tab. 3.5 jsou zobrazeny vypočtené hodnoty.

Tabulka 3.4: Zadané a zvolené parametry pro výchozí výpočet oběžného kola. (varianta A)

parametr		hodnota	
danný průtok	Q_v	60	m^3/h
požadovaný celkový tlak	Δp_{cv}	280	Pa
otáčky	n	4500	ot/min
vnější průměr kola	d_2	110	mm
součinitel konfuzornosti proudu	c_k	1.2	-
hydraulická účinnost ventilátoru	η_h	82	%
Výstupní úhel proudu	β_2	30	°

Tabulka 3.5: Výsledné parametry pro výběr motoru na základě výpočtu. (varianta A)

parametr		hodnota	
Potřebný výkon motoru	P_m	6,8	W
Potřebný točivý moment	M_{ap}	9,6	mNm

3.3. VÝPOČET OBĚŽNÉHO KOLA

3.3.3. Varianta B

Výchozími parametry při výpočtu podle [46] jsou také průtok ventilátorem $Q_V [m^3 \cdot s^{-1}]$, celkový tlak $p_{cv} [Pa]$ a otáčky (frekvence otáčení) $n [s^{-1}]$. Tím však podobnosti končí, tento výpočet je výrazně přímější a většina parametrů je přímo vypočtena, u těch ostatních je, až na jednu výjimku, vypočtena nějaká hraniční hodnota, podle které je možné parametr navrhnout. Toto je oproti výpočtu podle [45] (varianta A) výrazný rozdíl a může být jak výhodou tak nedostatkem. V případě, že návrh provádí zkušený konstruktér, tak mu to omezuje jeho volnost při návrhu, v případě, že tomu tak ale není a návrh je prováděn bez dostatku zkušeností a opírá se hlavně o výpočet tak se tento postup jeví jako lepší varianta. Dalším rozdílem je, že v [46] jsou použita často jiná označení jednotlivých veličin, které jsou uváděny v imperiálních jednotkách. Následující vzorce nejsou upraveny a až výsledné hodnoty jsou převedeny na jednotky metrické.

Jako první jsou vypočteny minimální hodnoty vnějšího průměru $d_{2,min}$ in podle vztahu 3.31 a vnitřního průměru $d_{1,min}$ in podle vztahu 3.24. Rozměry kola jsou znázorněny v obrázku 3.9.

$$d_{2,min} = \frac{18000}{rpm} \sqrt{SP} \quad [in] \quad (3.23)$$

kde $rpm [ot/min]$ jsou otáčky kola, $SP [inWC]$ (inches water column) je celkový tlak, odpovídající hodnotě $p_{cv} [Pa]$.

$$d_{1,min} = 10 \sqrt[3]{\frac{cfm}{rpm}} \quad [in] \quad (3.24)$$

kde $cfm [cfm]$ (cubic feet per minute) je průtok ventilátorem, odpovídá mu hodnota $Q_V [m^3 \cdot s^{-1}]$.

Na základě vypočtených $d_{1,min}$ a $d_{2,min}$ jsou zvoleny reálné d_1 a d_2 . Dále je třeba určit šířku oběžného kola. Na rozdíl od předchozího výpočtu uvažuje tento návrh konstantní šířku kola b po celém průřezu. Důvodem je snížení ztrát na konci kola, kde vzdušina náhle expanduje do spirální skříně většího průtočného průřezu, v případě konstantní šířky $b [in]$ probíhá tato expanze z menší rychlosti a ztráta je tím snížena. Výpočet určuje minimální šířku $b_{min} [in]$ a šířku maximální $b_{max} [in]$. Reálná šířka b je pak určena na základě objemového průtoku.

$$b_{min} = 0,221 \cdot d_1 \quad [in] \quad (3.25)$$

$$b_{max} = 0,442 \cdot d_1 \quad [in] \quad (3.26)$$

Na základě hlavních rozměrů kola jsou určeny jednotlivé průtočné průřezy a rychlosti. Jako první je určen průtočný průřez na vstupu do lopatkové mříže $A_1 [ft^2]$.

$$A_1 = \frac{d_1 \pi b}{144} \quad [ft^2] \quad (3.27)$$

Rychlost náběžné hrany lopatky, neboli obvodovou rychlost kola na vstupu do lopatkové mříže $V_{B1} [fpm]$ (feet per minute) je určena vztahem 3.28.

$$V_{B1} = \frac{d_1 \pi}{12} \cdot rpm \quad [fpm] \quad (3.28)$$

Rychlost proudu vzdušiny na vstupu do kola V_1 fpm pak lze určit:

$$V_1 = \frac{cfm}{A_1} = 45,8 \frac{cfm}{d_1 b} \quad [fpm] \quad (3.29)$$

Nyní lze určit vstupní úhel β_1 [°], ten většinou vychází mezi deseti až třiceti stupni.

$$\tan \beta_1 = \frac{V_1}{V_{B1}} = 175 \frac{cfm}{d_1^2 \cdot rpm} \quad [^\circ] \quad (3.30)$$

Analogicky k ploše A_1 a rychlosti V_{B1} je vypočtena plocha na výstupu z kola A_2 [ft^2] a rychlost V_{B2} [fpm].

$$A_2 = \frac{d_2 \pi b}{144} \quad [ft^2] \quad (3.31)$$

$$V_{B2} = \frac{d_2 \pi}{12} \cdot rpm \quad [fpm] \quad (3.32)$$

Rychlost proudu na výstupu z kola V_2 už však podobně jako rychlost V_1 na vstupu vypočítat nelze, není totiž kolmá na osu jako rychlost V_1 . Je tedy třeba vypočítat její radiální složku V_{2r} [fpm] a obvodovou složku V_{2c} [fpm] podle vztahů 3.33 a 3.34. V případě dříve zavedeného značení odpovídá V_{2r} c_{2m} a V_{2c} c_{2u} .

$$V_{2r} = \frac{cfm}{A_2} = 45,8 \frac{cfm}{d_2 b} \quad [fpm] \quad (3.33)$$

$$V_{2c} = K \frac{SP}{rpm \cdot d_2} \quad [fpm] \quad (3.34)$$

kde K je korekční konstanta upravující výpočet z hlediska hydraulických ztrát. Její přesnou hodnotu nelze analyticky určit a bývá odhadována na základě zkušeností a dalších korekčních faktorů. Vzhledem k tomu, že koeficient K není na základě čeho odhadnout bude složka rychlosti V_{2c} vypočtena z rovnice pro výpočet 3.35. To však znamená, že výstupní úhel β_2 [°] je třeba určit, při tom lze vyjít z velikosti vstupního úhlu β_1 . Obecně platí, že zvětšení úhlu β_2 znamená zvýšení průtoku a snížení hydraulické činnosti.

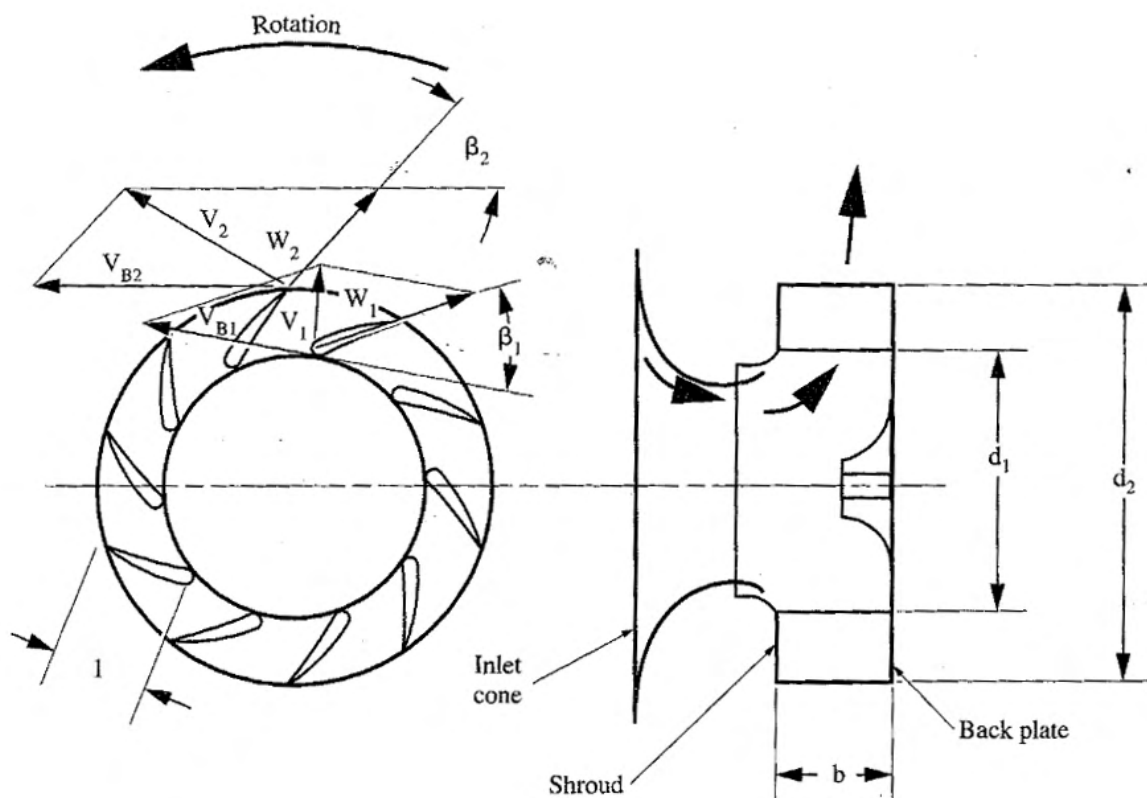
$$\tan \beta_2 = \frac{V_{2r}}{V_{B2} - V_{2c}} \quad [^\circ] \quad (3.35)$$

Jako poslední je určen průměr vstupního hrdla d_s [in] a průtočný průřez na vstupu do ventilátoru A_s [ft^2]. Stejně jako v případě předchozího výpočtu jsou β_1 a β_2 návrhové úhly pro proud vzdušiny a je třeba určit úhly lopatek β_{1B} a β_{2B} tzn. určit úhel náběhu i a úhel deviační δ viz obr. 3.6. Náběhový a deviační úhel se obvykle navrhnou relativně malé, přibližně 2 až 3 stupně. [49]

$$d_s = 0,94 d_1 \quad [in] \quad (3.36)$$

$$A_s = \left(\frac{d_s}{24} \right)^2 \pi \quad [ft^2] \quad (3.37)$$

3.3. VÝPOČET OBĚŽNÉHO KOLA



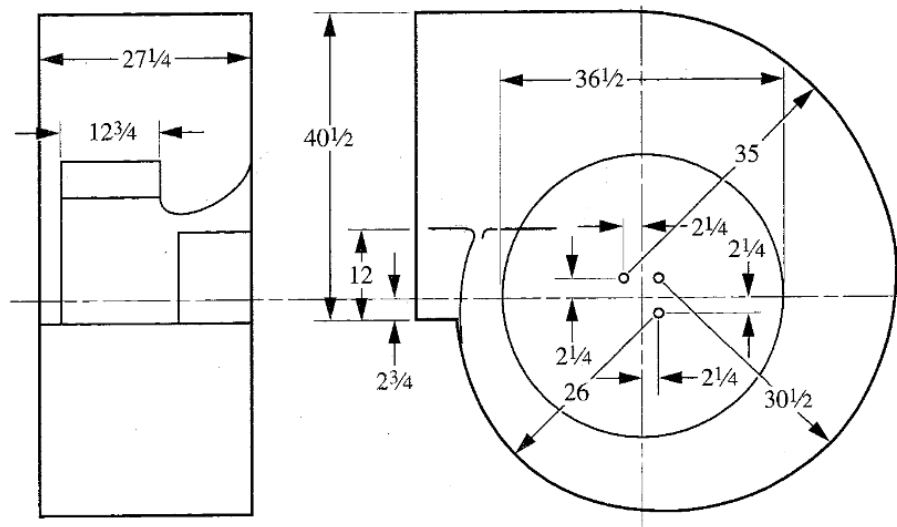
Obrázek 3.9: Schéma rozměrů oběžného kola se zakreslenými rychlostními trojúhelníky [46].

Počet lopatek

Počet lopatek je kompromisem mezi dvěma faktory, na jednu stranu je třeba jejich dostatečný počet, aby byl kanál mezi nimi dostatečně úzký a dobře vedl proud vzduchu, na stranu druhou ale příliš velký počet lopatek způsobí příliš velký odpor. Obecně platí, že odtoková hrana jedné lopatky by měla těsně překrývat náběžnou hranu vedlejší lopatky. V praxi to nejčastěji odpovídá osmi až dvanácti lopatkám.

Spirální skříň

Návrh spirální skříň je velmi podobný jako v knize ventilátory, také jde o logaritmickou spirálu nahrazenou kruhovými oblouky o různých průměrech. Lehká odlišnost je však v celkových rozměrech a to hlavně na výstupu. Ten je výrazně širší a uvnitř se nachází tzv. recirkulační štít, jde vlastně o pokračování spirální křivky viz obr.: 3.10.



Obrázek 3.10: Schéma rozměrů spirální skříně s aproximací logaritmické spirály kruhovými oblouky, rozměry jsou uvedeny jako příklad pro oběžné kolo o průměru 36,5 palce [46].

Průměry jednotlivých oblouků nahrazujících spirálu jsou rovny.:

$$R_1 = 0,712 \cdot d_2 \quad [in] \quad (3.38)$$

$$R_2 = 0,837 \cdot d_2 \quad [in] \quad (3.39)$$

$$R_3 = 0,962 \cdot d_2 \quad [in] \quad (3.40)$$

Vzdálenost středů těchto oblouků od obou os je rovna.:

$$e = 0,0625 \cdot d_2 \quad [in] \quad (3.41)$$

Šířka skříně je vypočtena podle šířky oběžného kola, pokud je šířka kola rovna maximální šířce kola b (viz vztah. 3.26) pak je šířka skříně rovna 75 % této šířky, pokud je šířka b zmenšená, pak je šířka skříně zmenšená ve stejném poměru. Výsledná výška je určena podle vztahu 3.42 a její necelá třtina, konkrétně 20 až 30 % má být zabrána dříve zmíněným recirkulačním štítem. I přesto je výrazně vyšší než v případě předchozího výpočtu.

$$H_{sh} = 1,12 \cdot d_2 \quad [in] \quad (3.42)$$

Parametry pro výběr motoru

Parametry pro výběr motoru jsou vypočteny stejně jako v případě varianty A, viz 3.3.2. Moment síly je vypočten podle vztahu 3.22 a výkon motoru je určen podle vztahu 3.20, hydraulická účinnost η_{cv} má v tomto případě předpokládanou hodnotu 80 %.

3.4. VÝBĚR VHODNÉHO BLDC MOTORU

Výsledky varianta B

V následujících tabulkách nejsou zobrazeny všechny výsledky výpočtu, to je v rámci tohoto oddílu bezpředmětné, důležité je stanovení výkonu a potřebného momentu síly elektromotoru, který bude vybrán v následující části práce viz 3.4. V tab. 3.6 jsou zobrazeny výchozí hodnoty pro návrh oběžného kola a v tab. 3.7 jsou zobrazeny vypočtené hodnoty.

Tabulka 3.6: Zadané a zvolené parametry pro výchozí výpočet oběžného kola. (varianta B)

parametr		hodnota	
danný průtok	Q_v	60	m^3/h
požadovaný celkový tlak	Δp_{cv}	280	Pa
otáčky	n	4500	ot/min
vnější průměr kola	d_2	110	mm
vnitřní průměr kola	d_1	60	mm
šířka kola	b	25	mm
hydraulická účinnost ventilátoru	η_h	80	$\%$
Výstupní úhel proudu	β_2	30	$^\circ$

Tabulka 3.7: Výsledné parametry pro výběr motoru na základě výpočtu. (varianta B)

parametr		hodnota	
Potřebný výkon motoru	P_m	7	W
Potřebný točivý moment	M_{ap}	20,7	mNm

Na základě tohoto výpočtu vyšel potřebný točivý moment více než dvojnásobný v porovnání s výpočtem předchozím. Při výběru motoru bude tedy pro jistotu uvažována tato hodnota.

3.4. Výběr vhodného BLDC motoru

Jak již bylo zmíněno na začátku této kapitoly, k optimalizaci pohonu ventilátoru byly vybrány BLDC motory. Těch je však na trhu celá řada. V minulém oddíle byly vypočteny dva hlavní parametry pro výběr motorů. Jejich potřebný výkon P_m je roven přibližně 7 W a potřebný moment síly M_{ap} je roven 20,7 mNm, toto je však jen moment potřebný na překonání síly proudu vzduchu, s momentem potřebným na rozběh kola nebylo počítáno, proto budou vybírány s motory s momentem síly okolo 25 až 30 mNm. Obecně je můžeme rozdělit do dvou kategorií, na motory s vnějším a vnitřním rotorem. Následující tabulka 3.8 uvádí hlavní rozdíly mezi těmito dvěma typy.

Tabulka 3.8: Základní rozdíly mezi motory s vnějším a vnitřním rotorem.

BLDC motor	vnitřní rotor	vnější rotor
rychlost	<ul style="list-style-type: none"> vysokorychlostní motory 	<ul style="list-style-type: none"> nízkootáčkové a středněotáčkové motory
setrvačnost	<ul style="list-style-type: none"> nízká setrvačnost 	<ul style="list-style-type: none"> vysoká setrvačnost
míra hluku	<ul style="list-style-type: none"> při častých změnách směru vysoká 	<ul style="list-style-type: none"> tišší provoz
údržba	<ul style="list-style-type: none"> menší nároky na údržbu 	<ul style="list-style-type: none"> vyšší nároky na údržbu
účinnost	<ul style="list-style-type: none"> vysoce účinné 	<ul style="list-style-type: none"> v porovnání s vnitřním rotorem méně účinné
kroučící moment	<ul style="list-style-type: none"> minimální 	<ul style="list-style-type: none"> tváří větší točivý moment
poměr výkonu a hmotnosti	<ul style="list-style-type: none"> menší 	<ul style="list-style-type: none"> vyšší
převodovka	<ul style="list-style-type: none"> doporučená 	<ul style="list-style-type: none"> není nutná
výhody	<ul style="list-style-type: none"> nízký moment setrvačnosti rotoru účinná disipace tepla kompaktnější vysoký výstupní výkon 	<ul style="list-style-type: none"> zvýšení kroučícího momentu a proudu snížení disipace tepla velká vzduchová mezera
nevýhody	<ul style="list-style-type: none"> vyžaduje vysokou hustotu magnetického toku potřeba vysoce výkonných magnetů 	<ul style="list-style-type: none"> složitá konstrukce rotoru osazeného magnety mechanická stabilita chlazení statorového vinutí

Na základě této tabulky není ihned zřejmé, který z typů je pro danou aplikaci vhodnější. Z hlediska účinnosti je to určitě motor s vnitřním rotorem, ale z hlediska točivého momentu je nedostačující. Rozhodujícím faktorem je v tomto případě rychlost otáčení, motory s vnitřním rotorem dosahují obvykle rychlostí přes 10 000 *ot/min*, což je pro aplikaci v radiálním ventilátoru příliš. Nabízí se využití převodovky, to ale komplikuje konstrukci. Z těchto důvodů byl vybrán **motor s vnějším rotorem**.

Při výběru BLDC motoru byla provedena rešerše následujících výrobců: ATAS elektromotory Náchod a.s. [61], Bühler Motor GmbH [62], Faulhaber [63], Johnson Electric [64], Maxon motor [65], Nanotec Electronic GmbH Co. KG [66], Ziehl-Abegg se [67].

Z nich byl výběr zúžen na 2 výrobce, Nanotec Electronic a Faulhaber. Hlavním důvodem bylo množství informací a hlavně charakteristických křivek, které tito výrobci u jednotlivých motorů uvádějí, dalším důvodem je pak možnost objednání řídicí jednotky přímo určené k danému motoru. Od těchto výrobců byl proveden výběr vhodných motorů pro danou aplikaci. Následující tabulka 3.9 uvádí vybrané motory a jejich parametry při maximální účinnosti

3.4. VÝBĚR VHODNÉHO BLDC MOTORU

Tabulka 3.9: Základní parametry vybraných BLDC motorů.

výrobce	model	η %	M mNm	n RPM	P W	U V	I A	
				při maximální účinnosti				
Faulhaber	4221 G018 BXT H	70	50	4300	23	18	2	
	3216 W009 BXT H	60	13	4300	6	9	1	
	3268 G018 BX4	77	50	4750	27	18	2	
	4490 H024 BS	85	80	5200	43	24	2,5	
Nanotec	DF45S024053-A2	70	46	5000	24	24	1,42	
	DF45M024053-A2	86	48	5518	27	24	1,34	
	DF45L024053-A2	85	76	4928	39	24	1,92	

V tabulce lze pěkně vidět trend nižší účinnosti méně výkonných motorů. Zároveň se dá pozorovat i trend nižších účinností u motorů s nižšími otáčkami. Po porovnání těchto variant s výpočtem kola vychází nejlépe 3 modely, 4221 G018 BXT H a 3216 W009 BXT H od výrobce Faulhaber a DF45S024053-A2 od výrobce Nanotec Electronic. Jsou to sice motory, které mají z vybraných nejnižší maximální účinnost, ale ostatní modely jsou příliš výkonné a mají zbytečně velký moment síly pro danou aplikaci.

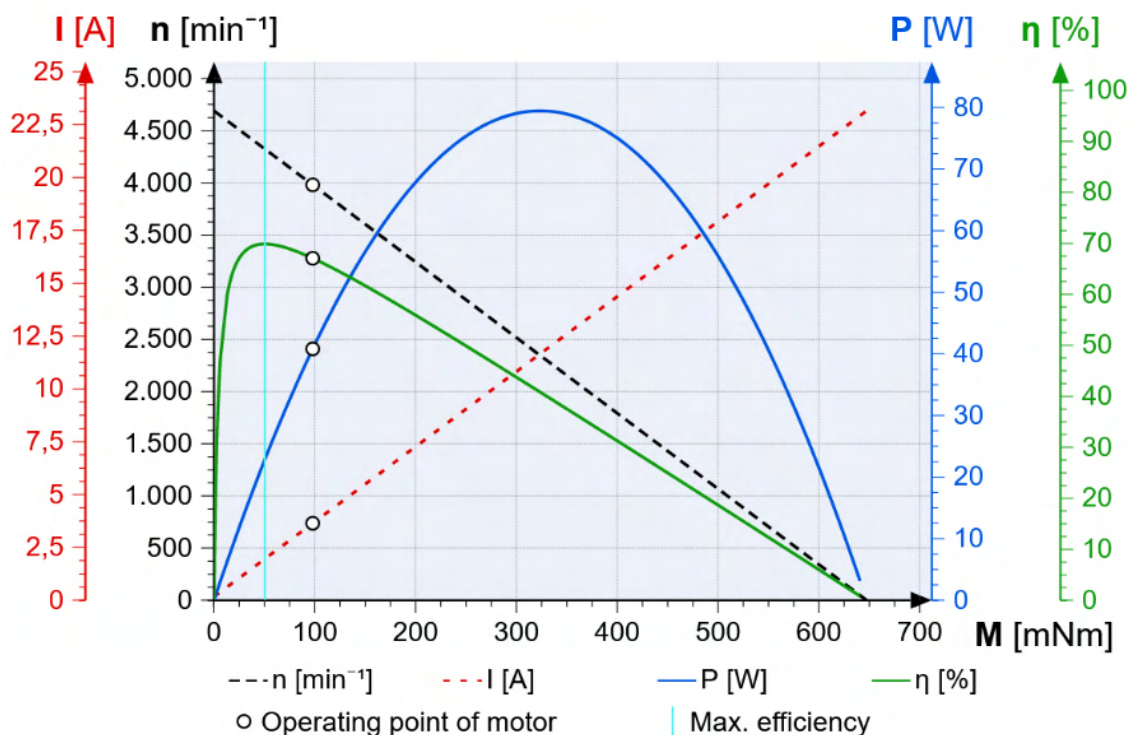
3.4.1. Faulhaber

4221 G018 BXT H

Je motor s vnějším rotorem (viz obr. 3.11) a relativně vysokým počtem pólových dvojic, konkrétně jich má 7. To má za následek vysoký moment síly v poměru k malým rozměrům a hmotnosti. Jedná se o motor relativně vysokého maximálního výkonu, optimální provozní bod má však v oblasti výkonu menšího. Pro danou aplikaci se nejlépe hodí varianta s napětím 18 V. Na obrázku 3.12 jsou zobrazeny charakteristiky tohoto motoru. Další informace a přesně parametry tohoto motoru jsou uvedeny v jeho katalogovém listu, který lze naléznout v příloze 3.



Obrázek 3.11: BLDC motor 4221 G018 BXT H od firmy Faulhaber [63].



Obrázek 3.12: Charakteristiky různých parametrů v závislosti na momentu síly motoru, nejdůležitější je závislost účinnosti a výkonu. Bílý puntík označuje optimální provozní bod motoru [63].

Na těchto charakteristikách lze pěkně vidět, že návrhový provozní bod je zcela mimo oblast maximálního výkonu a spíše v oblasti vyšší účinnosti, provozovat by ho, v tomto případě, bylo ideální při maximální účinnosti.

3216 W009 BXT H

Je velmi podobný předchozímu modelu (viz obr. 3.13), jen má o něco nižší všechny parametry, to se bohužel týká i účinnosti. Parametry tohoto motoru při nejvyšší účinnosti se pohybují těsně pod vypočtenými potřebnými parametry. To znamená, že tento motor by bylo třeba provozovat za mírně snížené účinnosti, v oblasti vyššího výkonu a momentu síly. Na obrázku 3.14 jsou zobrazeny různé charakteristiky tohoto BLDC motoru. Další informace a přesné parametry tohoto motoru jsou uvedeny v jeho katalogovém listu, který lze nalézt v příloze 4.

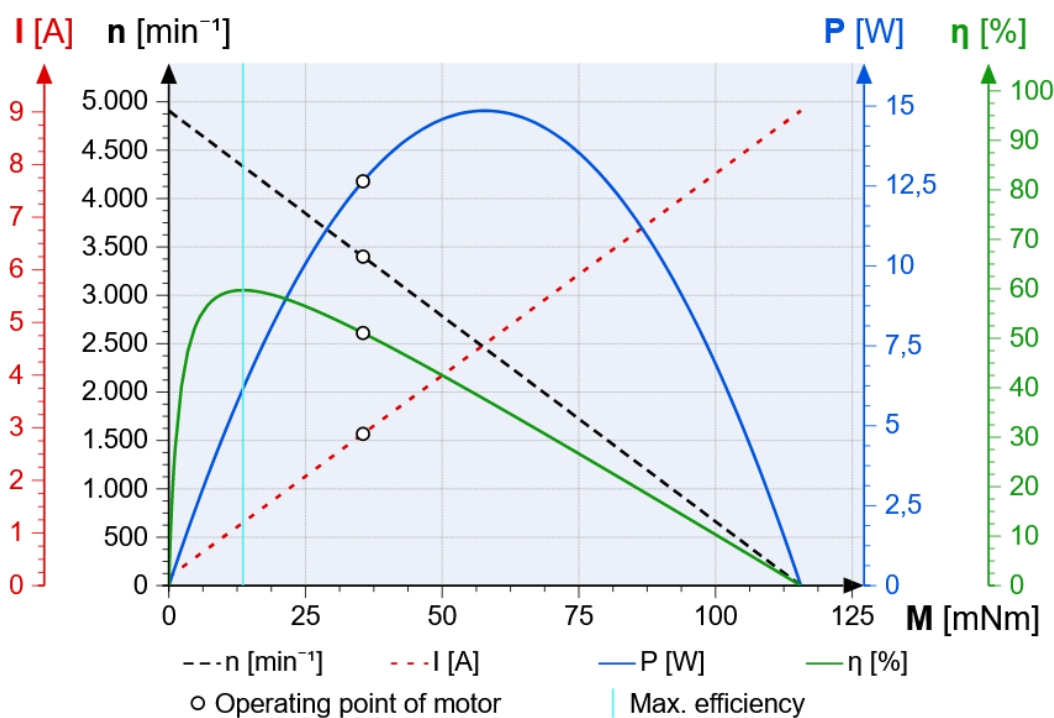
Řídící jednotka

Jak je již popsáno v oddíle 2.3.3 BLDC motory potřebují být elektronicky komutovány, k tomu slouží ve většině případů řídicí jednotka, ta bývá někdy přímo součástí motoru, v případě vybraných motorů od firmy Faulhaber tomu tak ale není a řídicí jednotka je samostatně. Firma Faulhaber nabízí několik řídicích jednotek, jako nejideálnější pro oba typy motorů se jeví **Motion Controllers Series MC 5005 S** viz obr. 3.15. Ideo multifunkční řídicí jednotku, s možností připojení k počítači, zároveň je k ní dodáván program **Motion Manager 6.0**, pomocí kterého je pak motor ovládán a laděn. Přesné parametry tohoto zařízení jsou uvedeny v jeho katalogovém listu, který lze nalézt v příloze 5.

3.4. VÝBĚR VHODNÉHO BLDC MOTORU



Obrázek 3.13: BLDC motor 3216 W009 BXT H od firmy Faulhaber [63].



Obrázek 3.14: Charakteristiky různých parametrů v závislosti na momentu síly motoru, nejdůležitější je závislost účinnosti a výkonu. Bílý puntík označuje optimální provozní bod motoru [63].

Na těchto charakteristikách lze pěkně vidět, že návrhový provozní bod je od nevyšší účinnosti značně posunutý. Kvůli jeho slabému výkonu a momentu síly by bylo třeba tento motor provozovat někde mezi jeho návrhovým provozním bodem a nevyšší účinností.

3.4.2. Nanotec

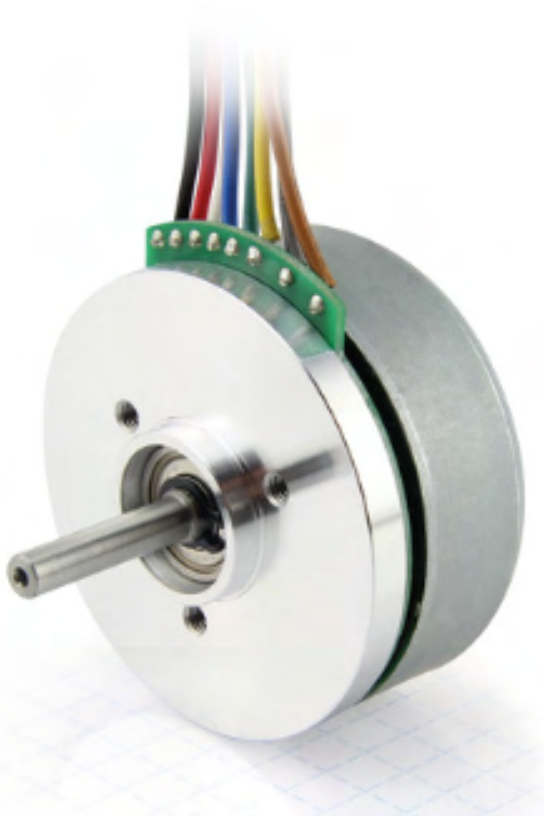
DF45S024053-A2

Je také motor s vnějším rotorem, oproti dvěma předešlým se však liší otáčkami, ty jsou výrazně vyšší. Výkon a moment síly tohoto motoru je vyšší než je třeba, slabší varianty



Obrázek 3.15: Řídící jednotka Motion Controller Series MC 5005 S [63].

podobného motoru ale bohužel nejsou k dispozici. Graf s jednotlivými charakteristikami (obr.: 3.17) vypadá srovnatelně jako u předchozích dvou modelů, samozřejmě s jinými hodnotami. Další informace a přesně parametry tohoto motoru jsou uvedeny v jeho katalogovém listu, který lze nalézt v příloze 6.

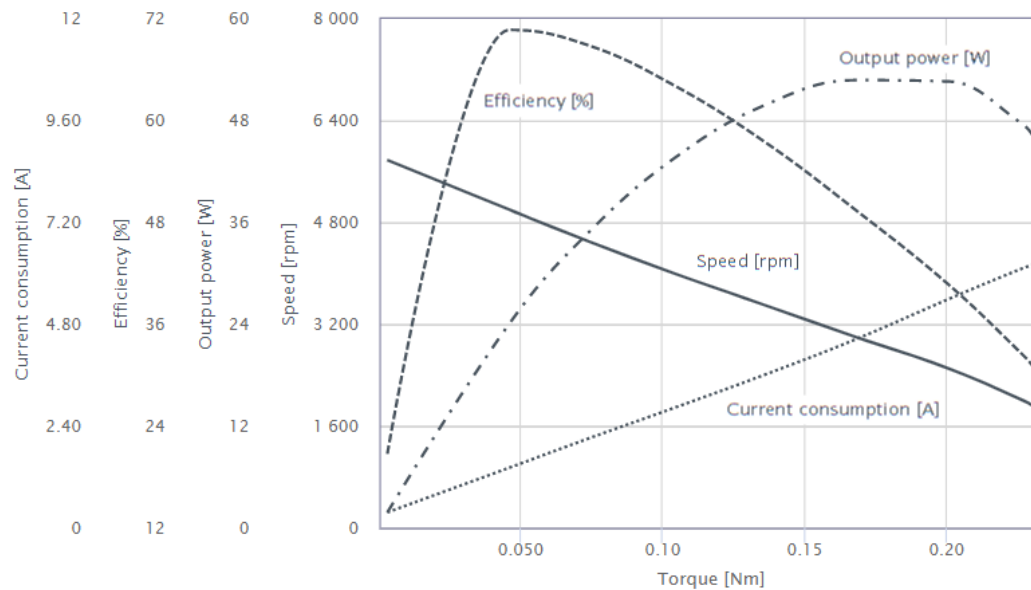


Obrázek 3.16: BLDC motor DF45S024053-A2 od firmy Nanotec Electronic GmbH Co. [66].

Řídící jednotka

Podobně jako v případě Faulhaberu je třeba vybrat k motoru řídicí jednotku, nabídka firmy Nanotec je výrazně větší co se řízení týče. Jako ideální varianta byla vybrána jednotka **CSL3-5 – BLDC CONTROLLER** (obr.: 3.18), nenabízí sice tolik možností připojení a není programovatelná, pro danou aplikaci je však zcela dostačující. Další in-

3.4. VÝBĚR VHODNÉHO BLDC MOTORU



Obrázek 3.17: Charakteristiky různých parametrů v závislosti na momentu síly motoru, nejdůležitější je závislost účinnosti a výkon [66].

formace a přesně parametry tohoto motoru jsou uvedeny v jeho katalogovém listu, který lze nalézt v příloze 7.



Obrázek 3.18: Řídící jednotka CSL3-5 – BLDC CONTROLLER [66] upraveno.

Dalším krokem během řešení optimalizace je dosazení otáček motorů do výpočtu oběžného kola a vyčíslení jeho přesných parametrů a rozměrů, tomu se věnuje následující oddíl 3.5.

3.5. Návrh oběžného kola

Postup výpočtu je popsán v předchozím oddíle 3.3 tato část práce se věnuje hlavně zobrazení výsledků upraveného výpočtu a návrhu zbývajících parametrů.

3.5.1. Varianta A

Tabulka 3.11 uvádí výchozí hodnoty návrhu podle [45], některé z nich jsou určené, jiné, jako například množství vzduchu, byly určeny výpočtem. Následující tabulka 3.10 uvádí vypočtené hodnoty podle návrhu.

Tabulka 3.10: Zadané a zvolené parametry pro výpočet oběžného kola poháněného motorem 4221 G018 BXT H nebo 3216 W009 BXT H. (varianta A)

parametr		hodnota	
tlakové číslo	ψ	0,708	—
průtokové číslo	ϕ	0,071	—
optimální poměr průměrů	$\left(\frac{d_1}{d_2}\right)_{opt}$	0,492	—
vnitřní průměr oběžného kola	d_1	54,16	mm
součinitel zmenšení teor. tlaku vent	ε	0,973	—
teoretické tlakové číslo	ψ_t	0,877	—
šířka oběžného kola na vstupu	b_1	11,3	mm
vstupní úhel proudu	β_1	35,4	°
šířka oběžného kola na výstupu	b_2	6,0	mm
hydraulická účinnost ventilátoru	η_h	83	%
vstupní úhel lopatky	β_{1B}	33	°
výstupní úhel lopatky	β_{2B}	28	°
konečná výška (rozevření) spirální skříně	a_{sp}	30	mm
odsazení středů oblouků	e	7,53	mm
absolutní rychlost na vstupu	c_1	11,3	mm
obvodová rychlost oběžného kola	u_1	35,4	°
rychlost vzdušiny ve spirální skříně	c_{sp}	6,0	mm
absolutní rychlost na výstupu	c_2	83	%
obvodová rychlost oběžného kola	u_2	30	mm
radiální složka absolutní rychlosti	c_{2m}	7,53	mm
obvodová složka absolutní rychlosti	c_{2u}	7,53	mm

3.5. NÁVRH OBĚŽNÉHO KOLA

Tabulka 3.11: Vypočtené parametry oběžného kola poháněného motorem 4221 G018 BXT H nebo 3216 W009 BXT H. (varianta A)

parametr		hodnota	
danný průtok	Q_v	60	m^3/h
požadovaný celkový tlak	Δp_{cv}	280	Pa
otáčky	n	4300	ot/min
vnější průměr kola	d_2	110	mm
součinitel konfuzornosti proudu	c_k	1.2	-
hydraulická účinnost ventilátoru	η_h	82	%
Výstupní úhel proudu	β_2	30	°
šířka spirální skříně	b_{sp}	68	mm
průměr sacího ústí	d_0	54	mm
úhel náběhu	i	2	°
deviační úhel	δ	2	°



Obrázek 3.19: Vizualizace návrhu oběžného kola. (varianta A)

3.5.2. Varianta B

Stejně jako v předchozím odstavci obsahují následující tabulky zadaná a navržené parametry oběžného kola. Tentokrát však vypočteny podle [46]. Na obrázku 3.20 je pak znázorněn model navrženého kola.

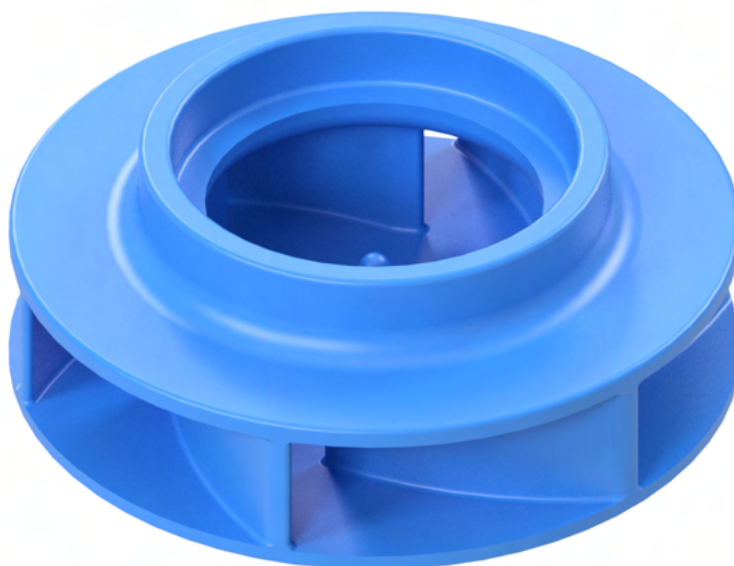
3. OPTIMALIZACE VENTILÁTORU

Tabulka 3.12: Zadané a zvolené parametry pro výpočet oběžného kola poháněného motorem 4221 G018 BXT H nebo 3216 W009 BXT H. (varianta B)

parametr		hodnota		
daný průtok	cfm	Q_v	60	m^3/h
požadovaný celkový tlak	SP	p_{cv}	280	Pa
otáčky		n	4500	ot/min
vnější průměr kola		d_2	110	mm
vnitřní průměr kola		d_1	60	mm
šířka kola		b	20	mm
hydraulická účinnost ventilátoru		η_h	80	$\%$
Vstupní úhel proudu		β_2	30.0	$^\circ$
úhel náběhu		i	2	$^\circ$
deviační úhel		δ	2	$^\circ$

Tabulka 3.13: Vypočtené parametry oběžného kola poháněného motorem 4221 G018 BXT H nebo 3216 W009 BXT H. (varianta B)

parametr		hodnota		
minimální vnitřní průměr		d_{1min}	50.5	mm
minimální vnější průměr		d_{2min}	107.7	mm
maximální šířka kola		b_{max}	27.6	mm
minimální šířka kola		b_{min}	13.26	mm
plocha na vstupu do lopatkování	S_1	A_1	3770	mm^2
Vstupní úhel		α_1	17.4	$^\circ$
plocha na výstupu z lopatkování	S_2	A_2	6912	mm^2
vstupní průměr	d_s	d_0	51	mm
Plocha vstupu do ventilátoru	S_0	A_s	2043	mm^2
vstupní úhel lopatky		α_{1B}	15	$^\circ$
výstupní úhel lopatky		α_{2B}	38	$^\circ$
poloměr spirální skříně		$R1$	78	mm
poloměr spirální skříně		$R2$	92	mm
poloměr spirální skříně		$R3$	106	mm
odsazení středů oblouků	e		6.88	mm
šířka spirální skříně	b_{sp}		60	mm
výška spirální skříně na výstupu	a_{sp}		123	mm
Obvodová rychlost kola vstup	u_1	V_{B1}	14.1	m/s
absolutní rychlost na vstupu	v_1	V_1	4.4	m/s
obvodová rychlost kola výstup	u_2	V_{B2}	25.9	m/s
radiální složka abs. rychlosti	c_2r	V_2r	2.4	m/s
obvodová složka abs. rychlosti	c_2u	V_2c	21.7	m/s
potřebný výkon motoru	P_m		7.00	W
potřebný točivý moment	M_{ap}		19.93	mNm



Obrázek 3.20: Vizualizace návrhu oběžného kola. (varianta B)

3.5.3. Srovnání výsledků

Jak je na první pohled patrné, výsledné návrhy se výrazně liší a to nejen v šířce kola, ale i ve vnitřním průměru a úhlech lopatek. To znamená, že je na místě otestovat oba návrhy a porovnat je. Výsledky výpočtu podle [45] (var. A) mají však řadu nesrovnalostí. V knize jsou doporučené hodnoty tlakového čísla ψ , průtokového čísla ϕ , optimálního poměru průměrů $\left(\frac{d_1}{d_2}\right)_{opt}$, vypočtené hodnoty těchto parametrů se však dost liší. Jak už je zmíněno v oddíle 3.3.3 tak je v tomto výpočtu několik parametrů navrženo hlavně na základě zkušenosti konstruktéra. Během návrhu se však nepodařilo najít variantu, která by se zdála z hlediska doporučených parametrů vyhovující a zároveň vycházely rozumně i ostatní parametry. Pokud jsou do výpočtu dosazeny doporučené hodnoty ψ , ϕ a $\left(\frac{d_1}{d_2}\right)_{opt}$ dohromady s vypočteným průtokem, požadovaným tlakem a otáčkami tak výsledné hodnoty některých vypočtených parametrů pak nedávají fyzikálně smysl. Důvodem bude pravděpodobně nevhodná volba některého z volitelných parametrů. Je také možné, že navrhovaný ventilátor je atypický a tento postup je pro jeho výpočet nevhodný. V neposlední řadě vypadá navržené oběžné kolo spíše jako rotor vysokotlakého kompresoru než nízko až středotlakého ventilátoru.

Výpočet podle [46] (var. B) vypadá o poznání lépe, všechny parametry pěkně sedí a i model kola výrazně více připomíná oběžná kola radiálních ventilátoru co jsou na trhu. Z těchto důvodů byla varianta návrhu A vyhodnocena jako nevyhovující a dále bude uvažována pouze varianta B podle [46].

3.6. Návrh spirální skříně a ostatních komponent

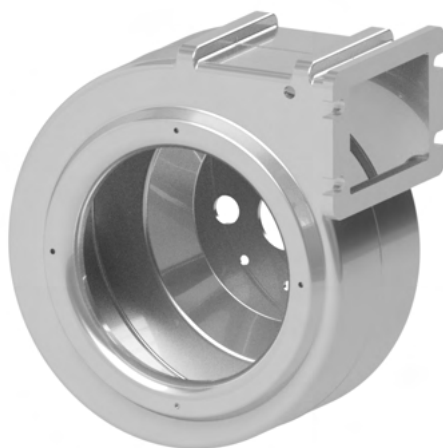
Návrh samostatného kola je sice nejdůležitější, ale samozřejmě nedostačující. Je třeba také návrh spirální skříně, která bude usměrňovat proud vzduchu. Také je třeba navrhnout uložení motoru a způsob připojení hřídele motoru ke kolu. Tento problém má více řešení, tím nejjednodušším je lehká úprava skříně stávající. To by sice znamenalo prav-

děpodobné zhoršení některých parametrů ventilátoru, ale nebude problém s připojením celého ventilátoru ke kotli. Další možností je návrh skříně přesně podle [46], tvar takové skříně však není příliš aerodynamický a velmi se podobá stávající skříně.

Byly tedy zvoleny dvě varianty návrhu: varianta B1, která spočívá v úpravě stávající skříně a varianta B2, při níž bude navržena skříně zcela nová, s rozměry podle [46] ale s odlišným, více aerodynamickým tvarem podle [49]. Podstatou varianty B1 je snazší možnost připojení ventilátoru ke kotli a podstatou varianty B2 je zvýšení účinnosti celkové činnosti ventilátoru.

3.6.1. Varianta B1

K úpravě stávající skříně byly navrženy 3 součásti, sací ústí, lože pro motor a zužující vložka, ta je potřebná, protože původní oběžné kolo s dopředu zahnutými lopatkami má větší průměr.



Obrázek 3.21: Model spirální skříně ventilátoru WPA 06

Sací ústí

Vstupu vzdušiny do hrdla jakékoliv trubice je doprovázen ztrátami, ty se však dají výrazně opežít zaoblením na vstupu, v [46] je toto zaoblení označeno jako "Venturi inlet" a minimální doporučená hodnota jeho poloměru r je $r = 0,14D$, kde D je průměr vstupu, čím je zaoblení větší, tím lépe. V případě vstupního hrdla pro stávající skříně je tato podmínka s rezervou splněna, zaoblení je navrženo podle propozice stávající skříně a nového oběžného kola. K montáži vstupního hrdla bude využito závitových děr, původně určených pro montáž ochranné mříže na vstupu.

Motorové lože

Ventilátor WPA 06 má motor vestavěný do skříně, ta má v zadní části rozšíření, ve kterém je dostatek místa i pro nový motor. V tomto případě je uvažován motor 4221 G018 BXT H. Lože je ke skříně připevněno pomocí montážních otvorů určených pro upevnění původního motoru. Připojení hřídele ke kolu bude zajištěno stavěcím šroubem (tzv. červíkem), ten

3.6. NÁVRH SPIRÁLNÍ SKŘÍŇE A OSTATNÍCH KOMPONENT

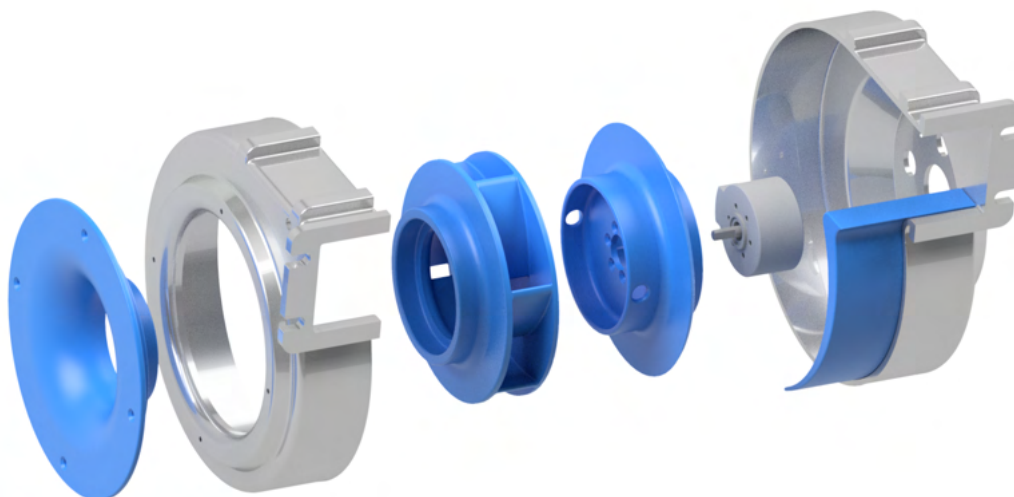
bude našroubován ve speciální závitové vložce určené pro 3D tisk, která bude pomocí pájky vtavena přímo do oběžného kola.

Zužující vložka

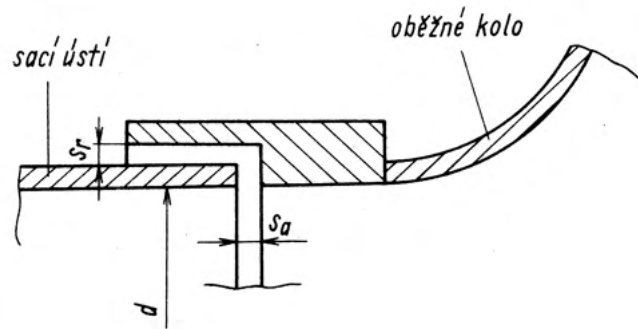
Jak je již zmíněno výše, nově navržené oběžné kolo má menší průměr, nežto původní. Je tedy žádoucí upravit vnitřní tvar logaritmické spirály tak, aby její začátek byl blíže ke kolu a nebyla tam příliš velká mezera, ta by mohla způsobovat ztráty recirkulací vzdušiny. Optimální velikost mezery mezi kolem a spirální skříní je podle [46] 5 až 10 % velikosti průměru oběžného kola.

Sestava B1

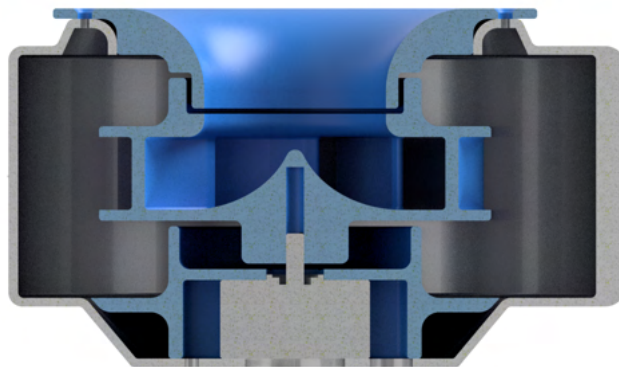
Na obr. 3.22 je znázorněn rozpad celé sestavy varianty B1. Na obr 3.24, je zobrazen řez touto sestavou, na kterém je vidět, jak do sebe jednotlivé části zapadají. Přechod mezi vstupním hrdlem a oběžným kolem, tzv. zámek oběžného kola, je navržen podle [45] viz 3.23. Vůle s_r a s_a byly zvoleny 1,5 mm.



Obrázek 3.22: Upravená skříně ventilátoru WPA 06 pro nové oběžné kolo podle [49].
Jednotlivé součásti zleva: sací ústí, přední část původní spirální skříně, oběžné kolo, lože motoru, elektromotor 4221 G018 BXT H, Zužující vložka, zadní část původní spirální skříně.



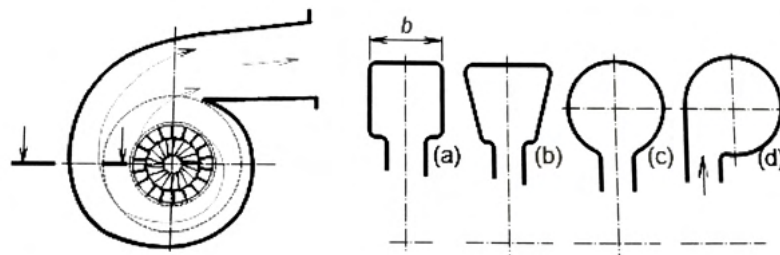
Obrázek 3.23: Schematické zobrazení zámku oběžného kola [45].



Obrázek 3.24: Řez Upravenou skříní ventilátoru WPA 06

3.6.2. Varianta B2

Existuje celá řada tvarů spirálních skříní lopatkových strojů, na obr. 3.25 jsou zobrazeny základní z nich. V případě nízko a středotlakých ventilátorů se obvykle volí tvary co nejjednodušší, kvůli ceně a jednoduchosti výroby. V případě této práce je však cílem dosáhnout co možná nejvyšší účinnosti, proto byl zvolen aerodynamicky lepší tvar skříně a to konkrétně tvar kruhový.



Obrázek 3.25: Základní tvary průřezu spirálních skříní lopatkových strojů: (a) obdelníková, (b) lichoběžníková, (c) kruhová, (d) tangenciální. [49]

Výpočet spirální skříně s konstantní šířkou podle [46], složí pouze k určení průtočného průřezu podél kola. Jinak řečeno, kruhová skříně je navržena tak, aby po celém obvodu měla stejný průtočný průřez jako vypočtená skříně podle [46]. Vzhledem k výsledné velikosti

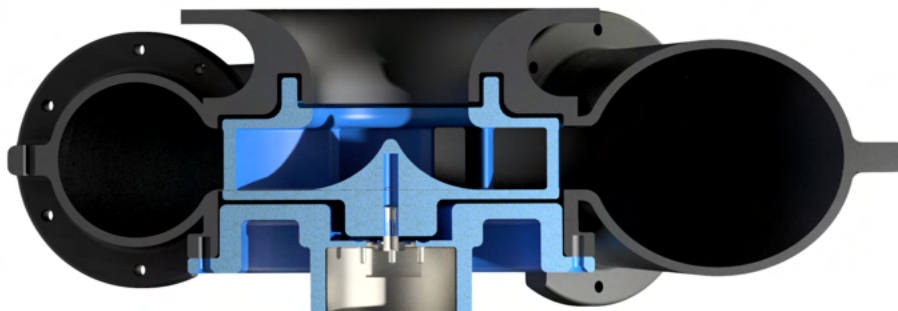
3.6. NÁVRH SPIRÁLNÍ SKŘÍŇE A OSTATNÍCH KOMPONENT

tohoto návrhu a omezené velikosti tiskové plochy byla navržená skříň rozdělena na sedm kusů. Šest z nich tvoří přímo průtočnou část a poslední sedmý slouží, podobně jako v předchozím případě, k uložení motoru. Jasně to jde vidět na obrázku 3.26 a 3.27.



Obrázek 3.26: Model návrhu nové skříně podle [46, 49].

Jednotlivé součásti zleva: přední část spirální skříně složená ze tří kusů, oběžné kolo, zadní část spirální skříně složená ze tří kusů, lože motoru, elektromotor 4221 G018 BXT H.



Obrázek 3.27: Řez návrhem nové skříně podle [46, 49].

4. Realizace návrhu

Jak je již výše několikrát zmíněno, k výrobě navrženého oběžného kola, součástí pro úpravu stávající skříně a nové spirální skříně bylo využito 3D tisku. Ten byl zvolen z následujících důvodů: 3D tisk je v rámci VUT snadno dostupná technologie, tvar jednotlivých částí je relativně komplexní a pro výrobu těchto částí by připadlo v úvahu ještě odlévání, nebo víceosé obrábění, to by však bylo velmi nákladné a výsledný kus by byl příliš těžký.

S 3D tiskem je však spojena i řada nevýhod, mezi hlavní patří: ne příliš vysoká přesnost dílů, to může hlavně v případě oběžného kola způsobovat potíže, protože nemusí být dobře vyvážené. Dalším nedostatkem je kvalita povrchu výtisku, v případě lopatkových strojů je třeba mít jednotlivé plochy, které budou v kontaktu s proudem vzdušiny, co nejhladší. Při výrobě jednotlivých dílů bylo proto třeba některé povrchy upravit.

4.1. Oběžné kolo B

Základním dílem je právě oběžné kolo, jedná se však také o tvarově nejsložitější ze všech dílů návrhu. Kvůli tomu se při jeho tisku objevilo několik problémů, jak je patrné z obrázku 4.1. První pokusy se často odlepovaly od tiskové podložky během tisku, docházelo také k posunutí vrstev a následné deformaci výtisku. To se podařilo vyřešit výrazným zpomalením tisku, což mělo samozřejmě za následek výrazné prodloužení doby tisku. Z důvodů pevnosti kola bylo prvotní myšlenkou vytisknout kolo v jednom kuse, vzhledem ke složitosti tvaru je k tomu ale zapotřebí podpor, ty se ukázaly jako dalším problémem, často se totiž spojily s výtiskem natolik silně, že téměř nebylo možné je odstranit, nebo při jejich odstranění zůstal povrch velmi nekvalitní.

Při tisku bylo také využito následujících materiálů, PETG, PLA, polykarbonát, ASA, CPE, HG100. Materiál však nepůsobil jako hlavní zdroj potíží při tisku, finální výtisk kola je tvořen materiálem PLA.



Obrázek 4.1: Nepovedené výtisky oběžného kola

Jako klíčové se nakonec ukázalo kolo rozdělit na 3 části, ty vytisknout zvlášť a slepit je dohromady viz obr 4.2 a 4.3. Vytisknuta byla samostatně spodní válec pro upevnění hřídele, prostřední část tzn. nosná deska s lopatkami a jako poslední kus krycí deska kola. Tímto bylo dosaženo nejen přesného výtisku, ale také relativně hladkého povrchu uvnitř lopatkové mříže. Jak je již zmíněno výše, tento finální výtisk je z PLA.

4.2. SPIRÁLNÍ SKŘÍŇ B1



Obrázek 4.2: Oběžné kolo podle návrhu B (vstupní strana)



Obrázek 4.3: Oběžné kolo podle návrhu B (zadní strana)

4.1.1. Test oběžného kola

Oběžné kolo má ve spirální skříni dosahovat relativně vysokých otáček, ty by mohly být pro pevnost výtisku fatální a mohlo by dojít k selhání součásti. Kolo také pravděpodobně nebude přesně vyvážené, což by k selhání ještě přispělo. Je tedy na místě kolo otestovat. Tento test proběhl na stolním CNC. K pracovnímu stolu stroje byla připevněna ochranná bariéra a kolo bylo připojeno k vřetenu stroje. To bylo roztočeno na 5000 *ot/min* a udržováno v chodu po dobu 5 *min*. Kolo bez problému vydrželo celý test. Celá sestava je zobrazena na obrázku.: 4.4.



Obrázek 4.4: Testování oběžného kola

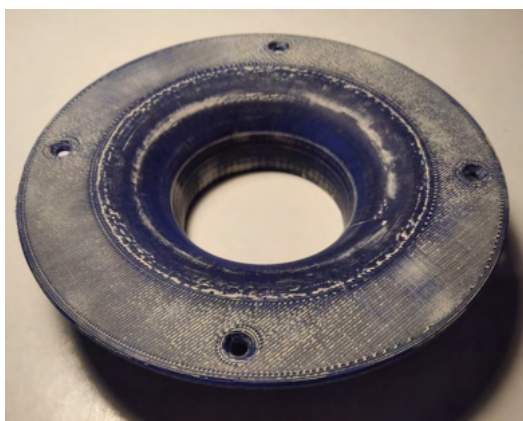
4.2. Spirální skříň B1

V případě tisku součástí pro úpravu stávající skříně nastaly jen drobné potíže, hlavně co se týče povrchu tištěných částí. Ten měl v případě vstupního hrdla příliš velkou drsnost povrchu, proto bylo nutné díl vytisknout pomaleji jako v případě oběžného kola. Nakonec

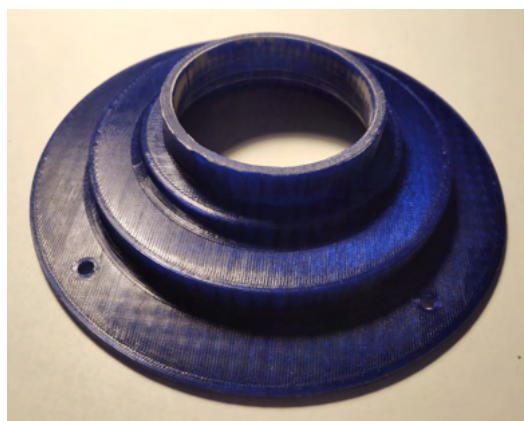
4. REALIZACE NÁVRHU

byl ještě povrch upraven, k tomu byl využit brusný papír, postupně *P80*, *P100* a *P120*, následně byl na povrch nanesena tenká vrstva plnicího polyesterového tmelu, tím byly vyplněny všechny nerovnosti. Nakonec byl zatmelený povrch vybroušen dohladka pod vodou pomocí brusného papíru *P320*, výsledek je vidět na obr.: 4.5.

Při tisku lože bylo využito organických podpor a díl byl na tiskové ploše otočen tak, že jeho osa byla rovnoběžná s povrchem. Toto se ukázalo jako velmi vhodné co se povrchu týče. Tem byl totiž velmi hladký a pro danou aplikaci se jeví jako zcela dostatečný, nebylo tedy třeba ho upravovat viz obr 4.8 a 4.7. Tento způsob tisku se však jeví jako nevhodný pro tisk jakýchkoliv rotačních částí. Tištěné vrstvy jsou totiž nevhodně orientovány, což s nejvyšší pravděpodobností snižuje pevnost dílu při jeho rotaci. Zároveň při tisku těchto vrstev dochází v horní části výtisku k mírnému naleptání dílu a jeho kvalita je zde o něco horší. Toto by pravděpodobně vedlo k vytvoření nevyvážku a díl by mohl při rotaci házet.



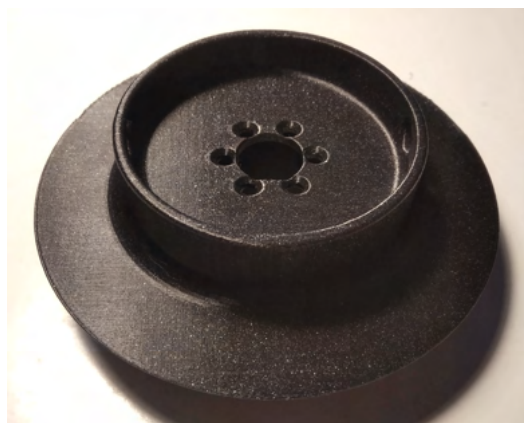
Obrázek 4.5: Vstupní hrdlo (vnější strana)



Obrázek 4.6: Vstupní hrdlo (vnitřní strana)



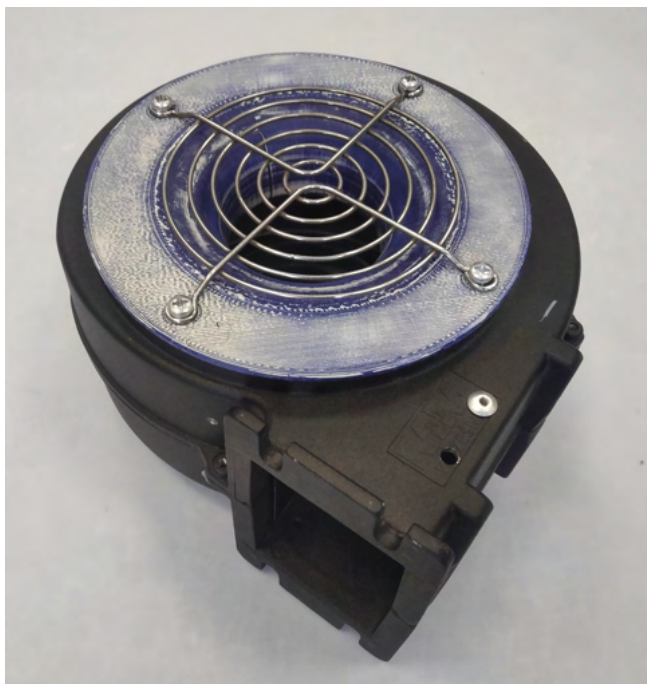
Obrázek 4.7: Motorové lože (strana s umístěním pro motor)



Obrázek 4.8: Motorové lože (strana s umístěním pro kolo)

K připevnění nových dílů ke stávající skříni bylo v případě sacího ústí a lože motoru využito již existujících montážních otvorů pro ochranu mřížku na vstupu do sání a pro uložení předchozího motoru. K tomu bylo zapotřebí otvorů se závitem na motorovém loži, proto byly do vytištěných otvorů vtaveny speciální závitové vložky k tomu určené. Na obr. 4.7 je vidět rozdíl mezi dírou se závitovou vložkou a bez ní. K upevnění vnitřní vložky byly navrtány nové otvory a vložka byla přitažena přímo do plastu pomocí vrtů. Celá sestava je zobrazena na obr. 4.9.

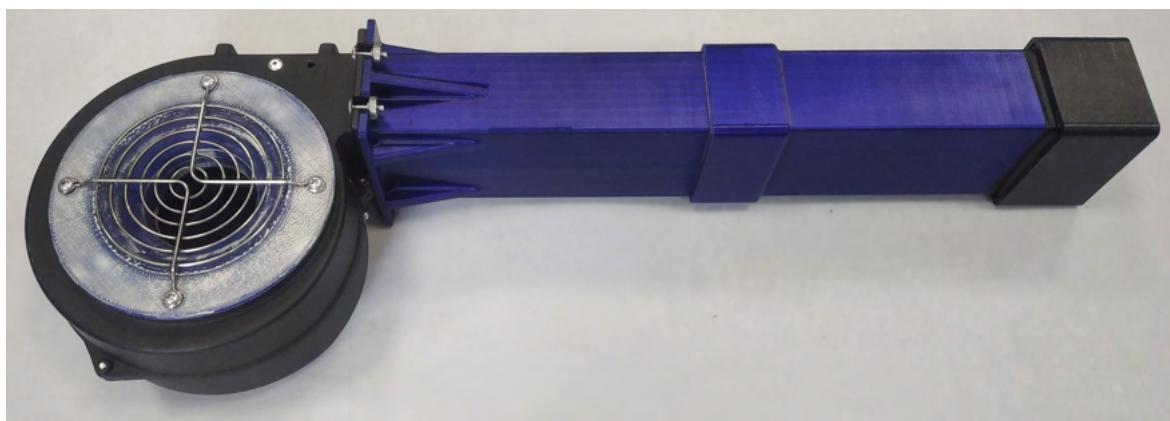
4.2. SPIRÁLNÍ SKŘÍŇ B1



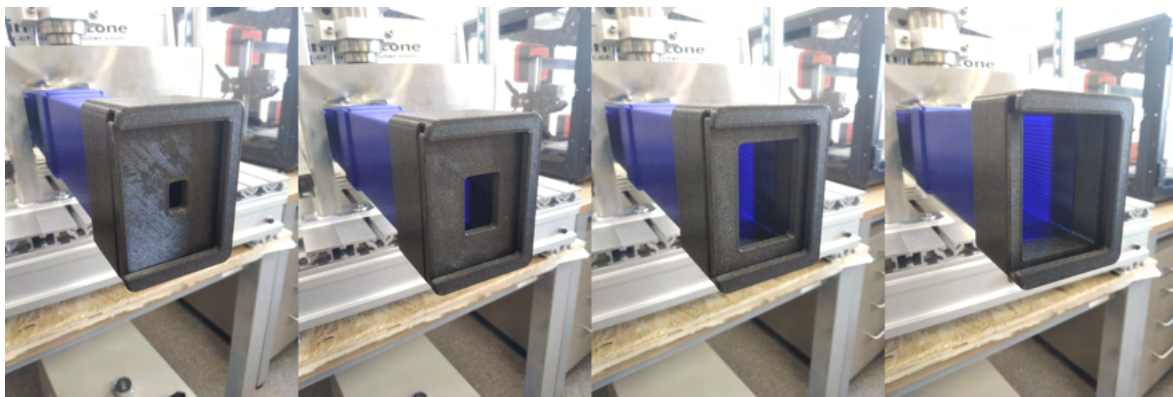
Obrázek 4.9: Upravená skříň ventilátoru WPA 06 podle návrhu B1

Potrubní trasa

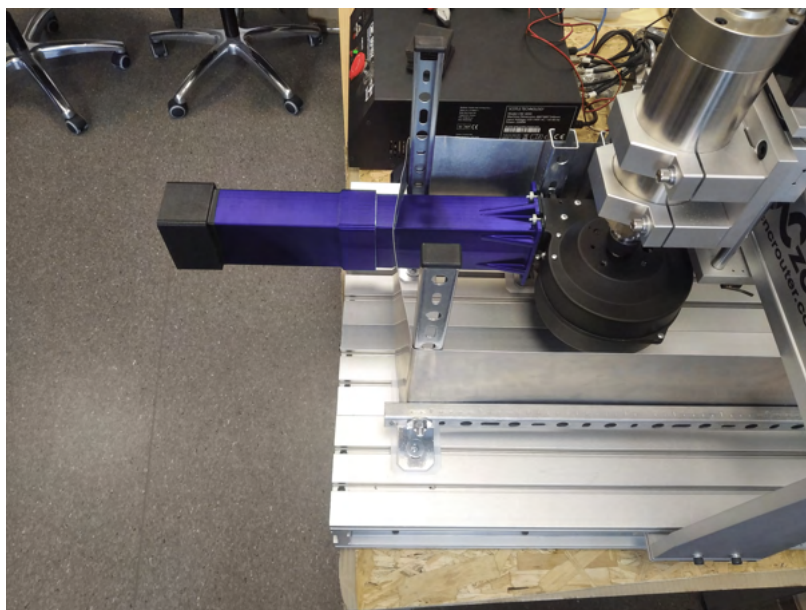
Pro testování a měření charakteristiky ventilátoru je potřebný dostatečně dlouhý rovný úsek potrubí, aby mohlo dojít k ustálení proudu vzduchu. Doporučuje se délka alespoň 10 průměru potrubí před místem měření a 5 průměru za ním. To bylo vytištěno ze dvou kusů, k ventilátoru připevněno pomocí šroubů a spoj mezi dvěma kusy je pomocí samosvorného nasunutí viz obr.: 4.10. Také je třeba nějak nahradit tlakovou ztrátu potrubního systému, toho se dá docílit například škrcením pomocí clony. Bylo proto vytištěno 7 různých clon, které by měly simulovat tlakovou ztrátu systému. K uchycení clon k potrubní trase bylo využito třetího kusu, do kterého se jednotlivé clony nasouvají, jak je patrné z obrázku 4.11. Celá sestava byla poté upevněna ke stolu CNC stroje a připravena k testování. Toto je patrné z obrázku 4.12 4.13.



Obrázek 4.10: Upravený ventilátor s připevněnou testovací potrubní trasou

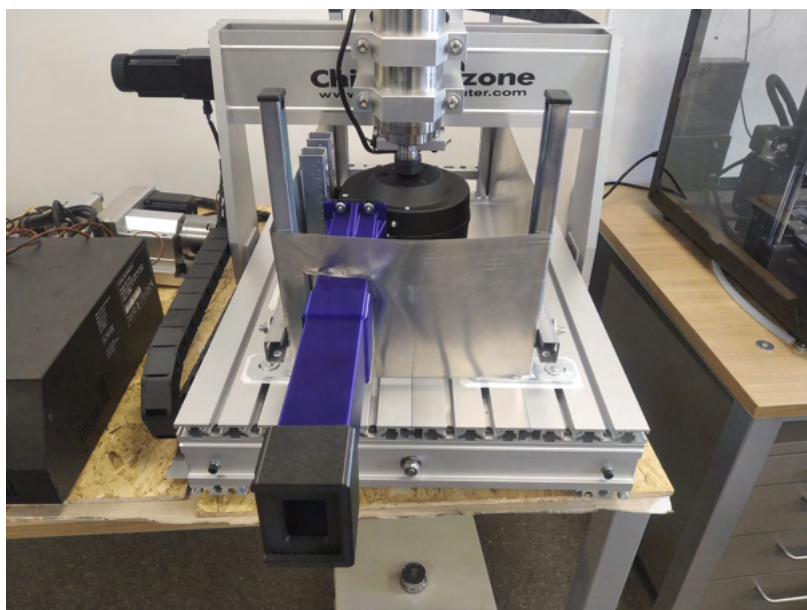


Obrázek 4.11: Zcela otevřená potrubní trasa (vpravo) ve srovnání se třemi clonami různých velikostí.



Obrázek 4.12: Zcela otevřená potrubní trasa (vpravo) ve srovnání se třemi clonami různých velikostí.

4.3. SPIRÁLNÍ SKŘÍŇ B2



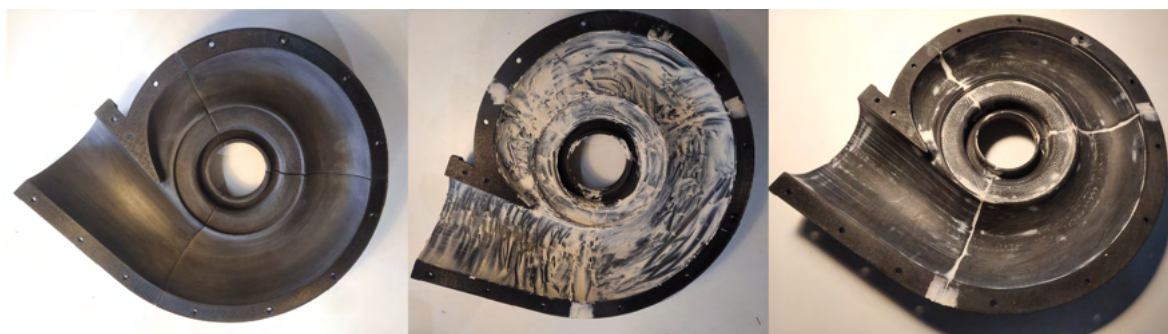
Obrázek 4.13: Zcela otevřená potrubní trasa (vpravo) ve srovnání se třemi clonami různých velikostí.

4.3. Spirální skříň B2

Jak je již zmíněno výše, průtočná část spirální skříně B2 byla navržena a vytištěna v šesti samostatných kusech. Přední polovina skříně, tzn. přední 3 kusy, (části se sáním) byla vytištěna s klasickými podporami, výsledek byl uspokojivý ale ne dostačující. Z tohoto důvodu byla zadní polovina, tzn. zadní 3 kusy, (části s uložením motoru) vytištěna za pomoci výše zmiňovaných organických podpor, kvalita vytištěného povrchu byla výrazně kvalitnější, zkrátila se doba tisku a podpory zabraly výrazně méně materiálu.

Jednotlivé kusy byly napevno spojeny pomocí kyanoakrylátového lepidla tak, že je spirální skříň rozebíratelná a složená ze dvou polovin, zadní a přední. Po jejich pevném spojení proběhla, stejně jako v případě vstupního hrdla předchozího návrhu, úprava povrchu na vnitřní straně. Povrch byl upraven pomocí brusných papírů a tmelu a to jak na přední tak i zadní části. Toto je patrné z obrázku 4.14. Úprava povrchů proběhla až po lepení, bylo tím dosaženo výrazně hladších přechodů mezi jednotlivými kusy polovin.

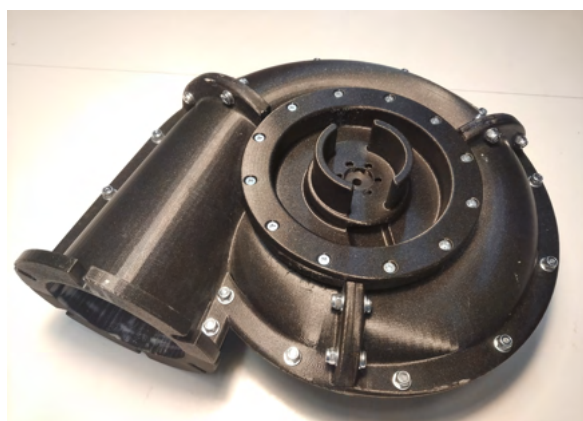
Přední a zadní polovina jsou k sobě upevněny pomocí 14 šroubů s matkou, viz obr. 4.16 a 4.17. Zadní polovina obsahuje 12 výše zmiňovaných závitových vložek pro upevnění motorového lože viz obr 4.15 a 4.16.



Obrázek 4.14: Jednotlivé kroky úpravy vnitřního povrchu spirální skříně B2
Přední polovina skříně B2 po slepení a vybroušení (vlevo), po vyplnění tmelem (uprostřed),
po finálním vybroušení pod vodou (vpravo).



Obrázek 4.15: Detail závitových vložek pro montáž motorového lože



Obrázek 4.16: Sestavená spirální skříně podle návrhu B2 zezadu



Obrázek 4.17: Sestavená spirální skříně podle návrhu B2

Závěr

Diplomová práce se zabývá optimalizací elektrického napájení domovního kotle na tuhá dřevní paliva. Konkrétně se jedná o snížení jeho příkonu.

První kapitola stručně popisuje domovní kotel a shrnuje legislativní požadavky, které se tohoto zařízení týkají. Hlavní částí této kapitoly je poměrně rozsáhlá rešerše parametrů komerčně dostupných kotlů na tuhá dřevní paliva o tepelných výkonech do 40 kW. Byla získána a vyhodnocena data celkem tři sta třiceti dvou domovních kotlů. Mimo jiné bylo například zjištěno, že automatické kotle mají při jmenovitém výkonu mírně vyšší příkon než kotle zplyňovací, ale při výkonu minimálním jsou na tom lépe.

Druhá kapitola se zaměřuje na popis konstrukce hlavních elektrických komponent domovních kotlů, a to především ventilátorů a oběhových čerpadel. Podobně jako v předchozí kapitole byla provedena rešerše jejich parametrů. Byla získána a vyhodnocena data celkem sto dvaceti osmi čerpadel a sto dvaceti ventilátorů. Hodnoty této rešerše sloužily k porovnání ventilátorů s čerpadly, hlavním kritériem byl příkon a účinnost zařízení. Bylo zjištěno, že ventilátory mají obecně výrazně nižší účinnost než oběhová čerpadla. Z tohoto důvodu nejsou v této kapitole čerpadla popsány příliš detailně a obecně jim v práci není příliš věnována pozornost. Výrazně více prostoru je pak věnováno popisu ventilátorů, je popsán jejich princip fungování, jejich konstrukce, a druhy jejich pohonů.

Třetí kapitola je věnována návrhu nového oběžného kola ventilátoru a úprav jeho spirální skříně. Na začátku jsou definovány parametry vybraného kotle, stávajícího ventilátoru a je aproximován ideální provozní bod. Následuje přímo návrh kola, to bylo navrženo ve dvou variantách podle dvou různých zdrojů. V souvislosti s návrhem nového kola byl také zvolen nový typ pohonu, konkrétně jde o BLDC motor. Ten je pro tuto aplikaci vhodný nejen z důvodů vysoké účinnosti, ale také kompaktních rozměrů a snadné regulaci otáček. Poté byly vybrány 3 konkrétní, na trhu dostupné, BLDC motory. Další částí bylo srovnání obou variant oběžných kol a výběr vhodnější z nich. V poslední řadě byly navrženy úpravy spirální skříně stávající a také byla navržena zcela nová skříně vhodnějšího aerodynamického tvaru.

Poslední čtvrtá kapitola popisuje realizaci návrhu, jeho sestavení a testování. K výrobě nového oběžného kola a spirální skříně bylo využito 3D tisku. Finální verze nového kola byla vytištěna ze tří kusů a napevno spojena pomocí kyanoakrylátového lepidla. Kolo bylo z hlediska pevnosti otestováno pomocí vřetená CNC frézky, kde bylo roztočeno na 5000 *ot/min* a vydrželo bez problému. Nová spirální skříně byla tištěna z šesti kusů a také napevno spojena pomocí kyanoakrylátového lepidla a šroubů. Vzhledem k nedostupnosti vybraného domovního kotle bohužel nebylo provedeno zhodnocení jeho provozu s nově navrženým a zkonstruovaným ventilátorem.

Seznam zdrojů

- [1] CZSO [online]. [cit. 28.1.2023]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/scitani2021/vysledky-prvni>
- [2] ČSN EN 303-5 (075303) - Kotle pro ústřední vytápění - Část 5: Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva - únor 2000 - Technické normy - Ing. Jiří Hrazdil. Prodej norem ČSN [online]. Copyright © 2003 [cit. 25.05.2023]. Dostupné z: <https://shop.normy.biz/detail/57735>
- [3] ČR. 201/2012 Sb: Zákon o ochraně ovzduší. 1. Praha, 2012, 78 s
- [4] ČSN EN 303-5 +A1 (075303) - Kotle pro ústřední vytápění - Část 5: Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva - duben 2023 - Technické normy - Ing. Jiří Hrazdil. Prodej norem ČSN [online]. Copyright © 2003 [cit. 25.05.2023]. Dostupné z: <https://shop.normy.biz/detail/516590>
- [5] STUPAVSKÝ, Vladimír. Směrnice o Ekodesignu pro kotle a kamna na tuhá paliva [online]. 2014 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/kotlikove-dotace/11937-smernice-o-ekodesignu-pro-kotle-a-kamna-na-tuha-paliva>
- [6] ENBRA, a.s. Zákaz používání kotlů na tuhá paliva až v roce 2024? [online]. 2022 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/vymeny-kotlu/23904-zakaz-pouzivani-kotlu-na-tuha-paliva-az-v-roce-2024>
- [7] Směrnice Evropského Parlamentu a Rady 2009/125/ES. [online]. Eur-Lex. Europa.eu [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:285:0010:0035:cs:PDF>
- [8] AGROMECHANIKA, . Kotle na tuhá paliva. *Kotle na tuhá paliva* [online]. Copyright © 2015. Agromechanika. V [cit. 11.11.2022]. Dostupné z: <https://www.agromechanika.cz/>
- [9] ATMOS, . Úvod - ATMOS [online]. Copyright © 2022 [cit. 11.11.2022]. Dostupné z: <https://www.atmos.eu/>
- [10] ATTACK, . Kotel pre vašu domácnosť | Kotel pre každého | ATTACK. *Kotel pre vašu domácnosť | Kotel pre každého | ATTACK* [online]. Copyright © [cit. 27.11.2022]. Dostupné z: <https://attack.sk/>
- [11] BENEKOV, . Automatické kotle na tuhá paliva | Benekov. *Kvalitní automatické kotle Benekov* [online]. Copyright © BENEKOV.COM [cit. 11.11.2022]. Dostupné z: <https://www.benekov.com/produkty>
- [12] CENTROMETAL, . Kotlovi za loženje peletima - Centrometal | TEHNIKA GRIJANJA. [online]. Copyright © Centrometal [cit. 26.11.2022]. Dostupné z: <https://www.centrometal.hr/kotlovi-za-lozenje-peletima/>
- [13] DEFRO, . Kocioł na pellet DEFRO - zobacz naszą gamę urządzeń. [online]. Dostupné z: <https://www.defro.pl/k,32,kotly-automatyczne-na-pellet-biomase.html>

SEZNAM ZDROJŮ

- [14] EASYPELL, . Umweltfreundliche Pelletzentralheizung (16-32 kW) » Easypell. Easypell: *Environmentally friendly wood pellet boiler (16-32 kW) » Easypell* [online]. Dostupné z: <https://www.easypell.com/at/>
- [15] EKO GALVA . s.r.o., Automatické kotle na uhlí a pelety, kotle na dřevo. *Automatické kotle na uhlí a pelety, kotle na dřevo* [online]. Dostupné z: <https://www.ekoscroll.cz>
- [16] ELEKTROMET, . Elektromet - technika grzewcza - Kotły peletowe. *Elektromet - technika grzewcza* [online]. Copyright © 2012 [cit. 01.12.2022]. Dostupné z: <https://elektromet.pl/pl/technika-grzewcza/oferta/45/d/kotly-peletowe>
- [17] ETA HEIZTECHNIK, . Home - ETA Heiztechnik GmbH. *Home - ETA Heiztechnik GmbH* [online]. Dostupné z: <https://www.eta.co.at/>
- [18] FRÖLING, . Holzheizung Biomasseheizung Hersteller aus Österreich - Fröling. *Holzheizung Biomasseheizung Hersteller aus Österreich - Fröling* [online]. Copyright © Fr [cit. 30.11.2022]. Dostupné z: <https://www.froeling.com/at.html>
- [19] GALMET, . Kotły c.o. z podajnikiem - 5 klasa. *Technika grzewcza - kotły C.O - Hybrydowe Systemy Ogrzewania - kolektory, pompy ciepła i wymienniki ciepła - Galmet* [online]. b.r. [cit. 01.12.2022]. Dostupné z: <https://galmet.com.pl/pl/podkategoria/kotly-co-5-klasa>
- [20] KALOR, . Pellet and wood boilers – Amg Spa. *Amg Spa - Biomass Heating Technologies* [online]. Copyright © 2022 Amg spa. All rights reserved [cit. 26.11.2022]. Dostupné z: <https://www.amg-spa.com/en/prodotti-brand/kalor-en/pellet-and-wood-boilers-kalor/>
- [21] KOLTON, . Producent kotłów C.O. na pellet, pompy ciepła – Kolton. *Producent kotłów C.O. na pellet, pompy ciepła – Kolton* [online]. Copyright © [cit. 02.12.2022]. Dostupné z: <https://www.kolton.pl/>
- [22] KOVARSON, . Kovarson.cz - výrobce kotlů. *Kovarson.cz - výrobce kotlů* [online]. Dostupné z: <https://www.kovarson.cz/cs/>
- [23] METAL-FACH Heating Technology - METAL-FACH Technika Grzewcza. *METAL-FACH Technika Grzewcza - Producent Kotłów C.O.* [online]. Copyright © Copyright METAL [cit. 26.04.2023]. Dostupné z: <https://metalfachtg.com.pl/en/metal-fach-technika-grzewcza-en/>
- [24] MODERATOR, . Kotły C.O. na pellet, piece na drewno, ekologiczne - Producent, Hajnówka - Moderator Sp. z o.o. *Kotły C.O. na pellet, piece na drewno, ekologiczne - Producent, Hajnówka - Moderator Sp. z o.o.* [online]. Copyright © 2017 [cit. 26.04.2023]. Dostupné z: <https://moderator.com.pl/>
- [25] OPOP, . výrobce kotlů na tuhá paliva. *OPOP výrobce kotlů na tuhá paliva* [online]. Dostupné z: <https://www.opop.cz/>
- [26] PETROJET TRADE, . Výrobky MultiBio. *Kotle na pelety MultiBio* [online]. Dostupné z: <https://www.multibio.eu/produkty>

- [27] PONAST, . Kotle na pelety PONAST spol. s. r. o.. *Automatické kotle na dřevní pelety / Kotle na pelety PONAST spol. s. r. o.* [online]. Dostupné z: <http://www.ponast.cz/produkt/automaticke-kotle>
- [28] ROJEK, . Teplovodní kotle na tuhá paliva | ROJEK. [online]. Copyright © [cit. 11.11.2022]. Dostupné z: <https://www.kotle-rojek.cz/cs/>
- [29] SAS, . SAS - Ekologiczne urządzenia grzewcze - *Kotły z EcoDesign, Pompy ciepła - ZMK SAS.* [online]. Dostupné z: <https://www.sas.busko.pl/pl/>
- [30] SLOKOV KOVO, . České kotle na tuhá paliva s více než 50 letou tradicí. *České kotle na tuhá paliva s více než 50 letou tradicí* [online]. Copyright © 2021 SLOKOV kovo a.s.. Všechna práva vyhrazena. [cit. 11.11.2022]. Dostupné z: <https://www.slokov.cz/>
- [31] VERNER SK s.r.o., . Produkty » Kotle Verner. *Kotle na pelety a tuhá paliva, kotle na dřevo a interiérové kotle (krbová kamna s výměníkem) » Kotle Verner* [online]. Copyright © 2022 [cit. 11.11.2022]. Dostupné z: <http://www.kotle-verner.cz/produkty>
- [32] WINDHAGER, . Heating solutions Made in Austria | Windhager. *Windhager Länderauswahl* [online]. Dostupné z: <https://www.windhager.com/en/products/>
- [33] Biral. *Biral - Moving people and elements* [online]. [cit. 2023-05-05]. Dostupné z: <https://www.biral.eu/en/>
- [34] BLAUBERG MOTOREN, Germany Centrifugal and Axial Fans Manufacturer, Factory. *Centrifugal and Axial Fans Manufacturer, Factory* [online]. Dostupné z: <https://blauberg-motoren.com/>
- [35] CALPEDA, *Calpeda čerpadla a čerpací technika* | Pumpa. [online]. Dostupné z: <https://www.pumpa.eu/cs/calpeda/>
- [36] CASALS, Casals Ventilation - Fans of innovation. [online]. Copyright © Casals, 2023 [cit. 05.05.2023]. Dostupné z: <https://www.casals.com/en/>
- [37] DAB water technology. DAB water technology [online]. [cit. 2023-05-05]. Dostupné z: <https://www.dabpumps.com/en>
- [38] EBM PAPST, ebm-papst – energy-saving fans and motors from the world market leader – engineering a better life. *ebm-papst – energy-saving fans and motors from the world market leader – engineering a better life.* [online]. Dostupné z: <https://www.ebmpapst.com/>
- [39] Grundfos: Grundfos Holding A/S. *Grundfos* [online]. Denmark [cit. 2023-05-05]. Dostupné z: <https://www.grundfos.com>
- [40] LOWARA, Lowara *Pumping and Circulating Solutions* | Xylem UK. [online]. [cit. 2023-05-05]. Dostupné z: <https://www.xylem.com/en-uk/brands/lowara/>
- [41] MPLUSM, . Ventilátory pro tepelné zdroje na tuhá paliva - MplusM. Fans for source of heat for solid fuel- MplusM [online]. Dostupné z: <http://www.mplusm-fan.com/cs/>

SEZNAM ZDROJŮ

- [42] NOVASERVIS. *Český výrobce vodovodních baterií a koupelnových doplňků* | NOVASERVIS [online]. Copyright ©2006 [cit. 05.05.2023]. Dostupné z: <https://www.novaservis.cz/>
- [43] SALUS Controls. *SALUS Controls* [online]. Copyright © QL CONTROLS 2020 [cit. 05.05.2023]. Dostupné z: <https://salus-controls.cz/>
- [44] WILO, Wilo – výrobce čerpadel | Wilo Česká republika. [online]. Dostupné z: <https://wilo.com/cz/cs/>
- [45] ČERMÁK, Jan. *Ventilátory*. Praha: SNTL, 1974. Řada strojírenské literatury.
- [46] BLEIER, F. P. *Fan handbook: selection, application, and design*. 1st. ed. McGraw Hill, USA, 1997. ISBN: 978-0070059337
- [47] BAŠTA, Jiří. *Hydraulika a řízení otopných soustav*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02808-9. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:f1584950-7561-11e4-9e20-005056827e52>
- [48] TAJBR, Stanislav. *Vytápění pro 1. a 2. ročník učebního oboru instalatér*. 2., upr. vyd. Praha: Sobotáles, 2003. ISBN 80-85920-96-4. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:8ac38e80-4b1f-11e6-a5c5-005056827e51>
- [49] ŠKORPÍK, Jiří. *Teorie lopatkových strojů*. Vydání druhé. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2022. Učební texty vysokých škol. ISBN 978-80-214-6102-4.
- [50] NOVÝ, Richard. *Ventilátory*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2007, c1993. ISBN 978-80-01-03758-4.
- [51] M. Markovic, A. Hodder and Y. Perriard, "An analytical determination of the torque-speed and efficiency-speed characteristics of a BLDC motor," *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, San Jose, CA, USA, 2009*, pp. 168-172, doi: 10.1109/ECCE.2009.5316437
- [52] SKÁLA, Zdeněk a Tadeáš OCHODEK. *Energetické parametry biomasy: projekt GAČR 101/04/1278*. V Brně: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007. Knihovnicka.cz. ISBN 978-80-214-3493-6.
- [53] HAŠEK, Pavel. *Tabulky pro tepelnou techniku*. 2. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1980. Vysokoškolské učební texty. ISBN (brož.)
- [54] MOHANRAJ, Deepak et al. A Review of BLDC Motor: State of Art, Advanced Control Techniques, and Applications. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2022. DOI: 10.1109/access.2022.3175011
- [55] CORE – Aggregating the world’s open access research papers [online]. Copyright ©GOJ1SU [cit. 09.02.2023]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/215234167.pdf>
- [56] CORE – Aggregating the world’s open access research papers [online]. Copyright ©Ho [cit. 09.02.2023]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/19155578.pdf>

- [57] KTS, Václav. *Elektrické pohony a výkonová elektronika. 1. vyd.* Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. 180 s. ISBN 80-7043-422-8.
- [58] ELEKTRO, . *Vlastnosti frekvenčně řízených pohonů s jednofázovými asynchronními motory* - Časopis Elektro - Odborné časopisy. Odborné časopisy [online]. Copyright © 2014 [cit. 24.02.2023]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/vlastnosti-frekvencne-rizenych-pohonu-s-jednofazovymi-asynchronnimi-motory-10255>
- [59] ELEKTRO, . *BLDC aneb DC motor s nulovými náklady na údržbu* - Časopis Elektro - Odborné časopisy. Odborné časopisy [online]. Copyright © 2014 [cit. 24.02.2023]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/bldc-aneb-dc-motor-s-nulovymi-naklady-na-udrzbu-10016>
- [60] Waide, P. and C. Brunner (2011), *Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems*, IEA Energy Papers, No. 2011/07, OECD Publishing, Paris. Dostupné z: <https://doi.org/10.1787/5kgg52gb9gjd-en>
- [61] ATAS, . ATAS elektromotory Náchod a.s.. *ATAS elektromotory Náchod a.s.* [online]. Copyright © 2009 [cit. 22.04.2023]. Dostupné z: <https://www.atas.cz/page.php?sekce=2lng=cz>
- [62] BÜHLER, . Bühler Motor GmbH [online]. [cit. 22.04.2023]. Dostupné z: <https://www.buehlermotor.de/index.html>
- [63] FAULHABER, . FAULHABER Drive Systems. [online]. Dostupné z: <https://www.faulhaber.com/en/>
- [64] JOHNSON ELECTRIC, . Johnson Electric. Johnson Electric [online]. Dostupné z: <https://www.johnsonelectric.com/en/privacy>
- [65] MAXON, . Maxon motor, maxon group. [online]. Copyright © 2023 maxon. All rights reserved. [cit. 22.04.2023]. Dostupné z: <https://www.maxongroup.com/maxon/view/content/index>
- [66] NANOTEC, . About Nanotec | NANOTEC. Nanotec - Precise and Reliable Motion Control Solutions [online]. Copyright © 1995 [cit. 22.04.2023]. Dostupné z: <https://en.nanotec.com/company/about-nanotec>
- [67] ZIEHL-ABEGG | Industrieventilatoren | Aufzugstechnik. ZIEHL-ABEGG | Industrieventilatoren | Aufzugstechnik [online]. Copyright © 2023 ZIEHL [cit. 22.04.2023]. Dostupné z: <https://www.ziehl-abegg.com/>

1. *PARAMETRY KOTLE EKOScroll DELTA S*

Seznam příloh

1. **Parametry kotle EKOScroll DELTA S**

TECHNICKÁ DATA EKOSROLL DELTA S

Typ kotle		EKOSROLL DELTA S 15	EKOSROLL DELTA S 25
Jmenovitý tepelný výkon	kW	16	24
Max. tepelný výkon	kW	20	28
Tepelný příkon	kW	18	26
Účinnost	%	88,8	88,5
Požadovaný komínový tah	mbar	0,15	0,2
Teplota spalin max/min	°C	220/137	222/143
Hmotnostní průtok spalin	kg.s-1	0,014	0,018
Obsah vody ve výměníku	lit	65	80
Rozsah regulace teploty	°C	60-85	
Minimální teplota zpátečky	°C	65	
Palivo		Dřevěná polena a dřevní odpad	
Délka polen	cm	33	50
Spotřeba paliva (tvrdé dřevo)	kg/h	4,4	5,6
Minimální doba hoření při jmenovitém výkonu (tvrdé dřevo)	h	2,5	3,5
Objem palivové šachty	lit	70	105
Minimální objem požadovaného akumulčního zásobníku	lit	600	1000
Teplota chladící vody pro pojistný výměník tepla	°C	< 10	
Pracovní přetlak	bar	2	
Tlaková zkouška	bar	4	
Třída kotle dle EN 303-5		5	
Třída energetické účinnosti		A+	
Příkon v pohotovostním režimu	W	3	
Průměrný příkon při jmenovitém výkonu	W	16	18
Napájecí napětí	V	230V/50Hz	
Hodnota akustického tlaku	dB	<51,4 ± 3,2	
Hmotnost	kg	214	360

2. *PARAMETRY VENTILÁTORU WPA 06*

2. Parametry ventilátoru WPA 06

RADIAL FAN WITH FORWARD CURVED BLADES

Ventilatore radiale con pale curve in avanti

Radialventilator mit vorwärts gekrümmten Schaufeln

Radiální ventilátor s dopředu zahnutými lopatkami



Motor type:

Voltage / Tensione / Spannung / Napětí:

Maximum pressure / Pressione massima / Maximaler Druck / Maximální tlak:

Max. air flow / Flusso aria max. / Max Luftfördermenge / Max.přítok vzduchu:

Speed / Numero di giri / Drehzahl / Počet otáček:

Power input / Potenza assorbita / Leistungsaufnahme / Příkon:

Weight / Peso / Gewicht / Hmotnost:

Material of impeller / Materiale della girante

/ Laufradmateriál / Materiál oběžného kola:

Flange / Flangia / Flansche / Příruba:

Size and holes can be adapted to the requirements

/ Dimensioni e fori possono essere adattati alle esigenze

/ Größe und Bohrungen kann den Anforderungen angepasst werden

/ Velikost a otvory mohou být přizpůsobeny požadavkům

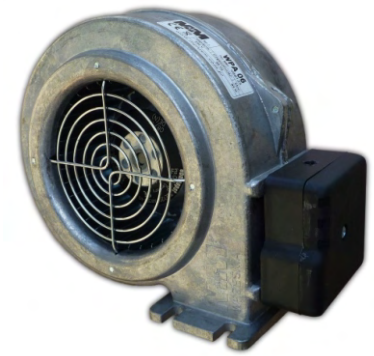
Fan dimensions / Dimensioni ventilatore

/ Lüfterabmessungen / Rozměry ventilátoru:

Connection diagram / Schema di collegamento

/ Anschlussbild / Schéma zapojení:

Curves / Curve / Curves / Křivka:



R2E 120-AR38-40

230V/50Hz

360 Pa

255 m³/h

2500 rpm

83 W

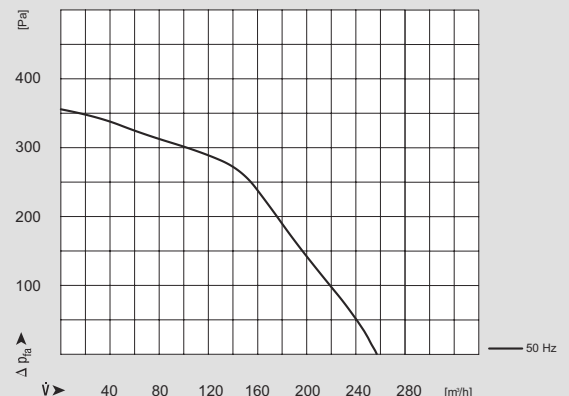
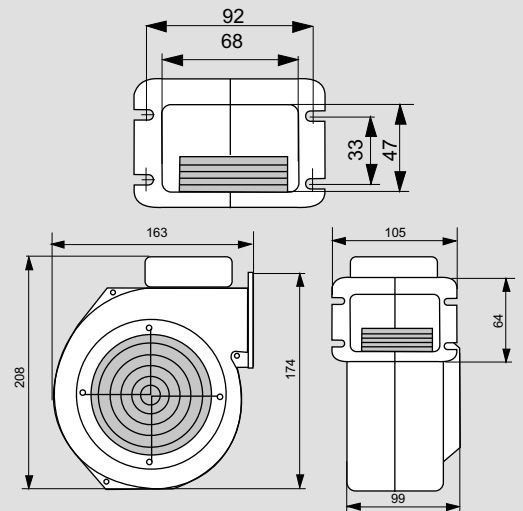
1,97 kg

galvanized steel / acciaio zincato

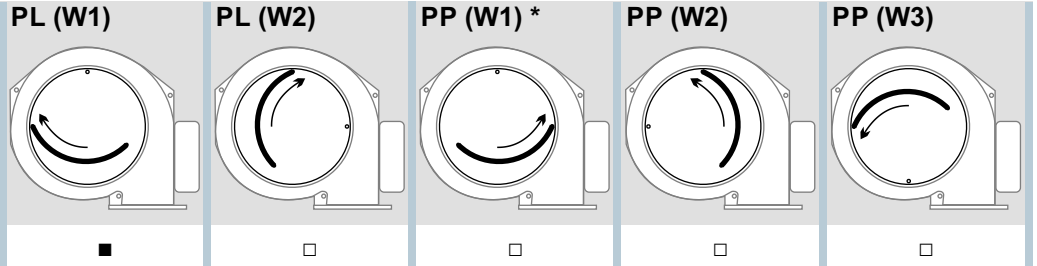
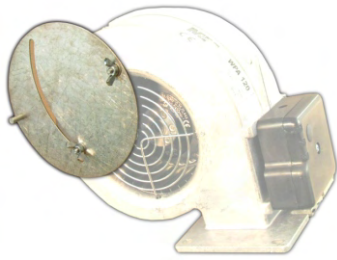
/ verzinkter Stahl / pozinkovaná ocel

WPA HL 06

*possible variant of a motor
(R2E 120-AR38-44)
with Hall sensor*

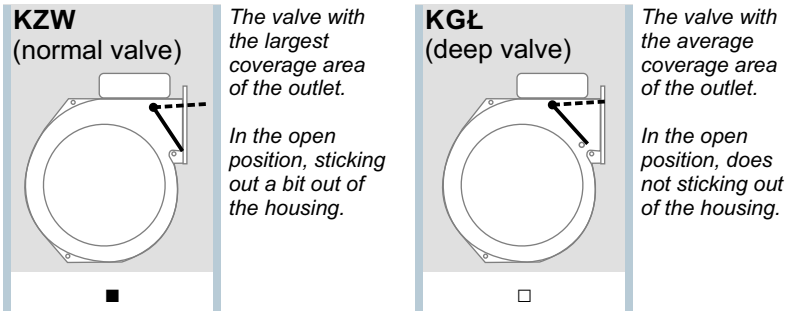


Screen / Apertura / Blende / Clona:



* PP(W1) - collision with normal valve KZW

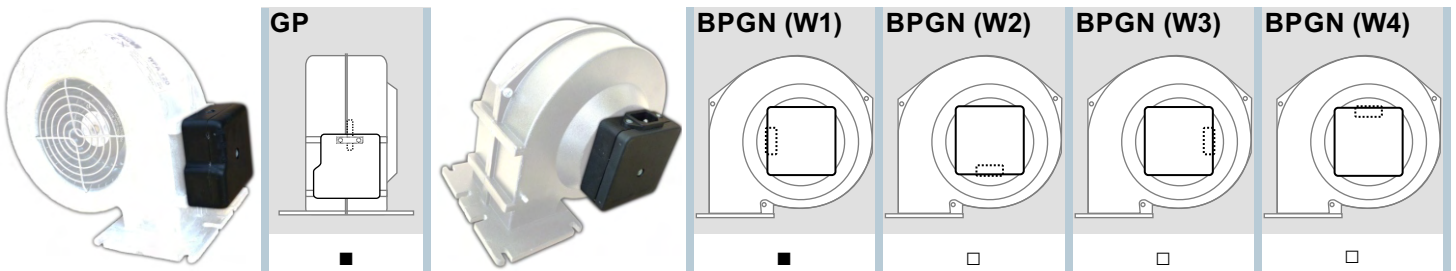
Valve / Valvola / Klappe / Klapka:



Electrical cabinet / Quadro elettrico / Schaltschrank / Elektrická skříň:

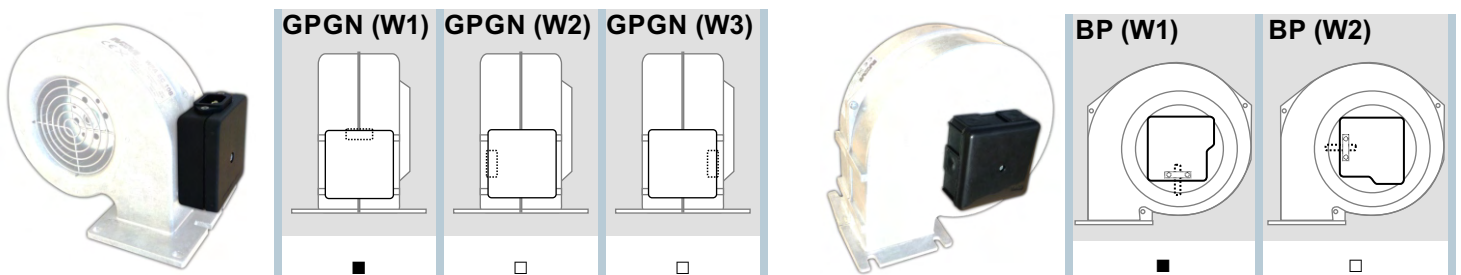
Upper assembly, with hole for the power cord

Side assembly, with IEC socket



Upper assembly, with IEC socket

Side assembly, with hole for the power cord



Power cable / Cavo di alimentazione / Stromkabel / Napájecí kabel:



- +0,15m
- +0,30m
- +0,80m
- +1,60m
- +2,00m
- +2,50m
- +3,00m

Gasket / Guarnizione / Dichtung / Těsnění:



U
flange gasket made of cork-rubber blend

Housing painted / Cover verniciata / Cover lackiert / Lakovaný kryt:



M
black semi-gloss powder coating

3. Parametry motoru 4221 G018 BXT

Brushless DC-Flat Motors

External rotor technology, with housing

112 mNm

60 W

Series 4221 ... BXT H

Values at 22°C and nominal voltage	4221 G	018 BXT H	024 BXT H	048 BXT H	
1 Nominal voltage	U_N	18	24	48	V
2 Terminal resistance, phase-phase	R	0,46	0,74	2,6	Ω
3 Efficiency, max.	η_{max}	88	87	88	%
4 No-load speed	n_0	5 710	6 040	6 070	min^{-1}
5 No-load current, typ. (with shaft \varnothing 5 mm)	I_0	0,177	0,139	0,103	A
6 Starting torque	M_A	1 170	1 220	1 390	mNm
7 Speed constant	k_n	320	253	127	min^{-1}/V
8 Back-EMF constant	k_E	3,13	3,95	7,87	$\text{mV}/\text{min}^{-1}$
9 Torque constant	k_M	29,8	37,7	75,2	mNm/A
10 Current constant	k_I	0,0335	0,0265	0,0133	A/mNm
11 Slope of n-M curve	$\Delta n/\Delta M$	4,93	4,97	4,4	$\text{min}^{-1}/\text{mNm}$
12 Terminal inductance, phase-phase	L	396	664	2 550	μH
13 Mechanical time constant	τ_m	3,56	3,59	3,18	ms
14 Rotor inertia	J	69	69	69	gcm^2
15 Angular acceleration	α_{max}	169	177	201	$\cdot 10^3 \text{rad}/\text{s}^2$
16 Operating temperature range:					
– motor		-40 ... +100			°C
– winding, max. permissible		+125			°C
17 Shaft bearings		ball bearings, preloaded			
18 Shaft load max.:					
– with shaft diameter		5			mm
– radial at 3 000 min^{-1} (5 mm from mounting flange)		25			N
– axial at 3 000 min^{-1} (push / pull)		4			N
– axial at standstill (push / pull)		50			N
19 Shaft play:					
– radial	\leq	0,015			mm
– axial	$=$	0			mm
20 Mass		142			g
21 Direction of rotation		electronically reversible			
22 Speed up to	n_{max}	10 000			min^{-1}
23 Number of pole pairs		7			
24 Hall sensors		digital			
25 Magnet material		NdFeB			
Rated values for continuous operation					
26 Rated torque	M_N	102	112	107	mNm
27 Rated current (thermal limit)	I_N	3,33	2,87	1,39	A
28 Rated speed	n_N	3 980	4 380	4 700	min^{-1}
29 Rated slope of n-M curve	$\Delta n/\Delta M$	17	14,8	12,8	$\text{min}^{-1}/\text{mNm}$

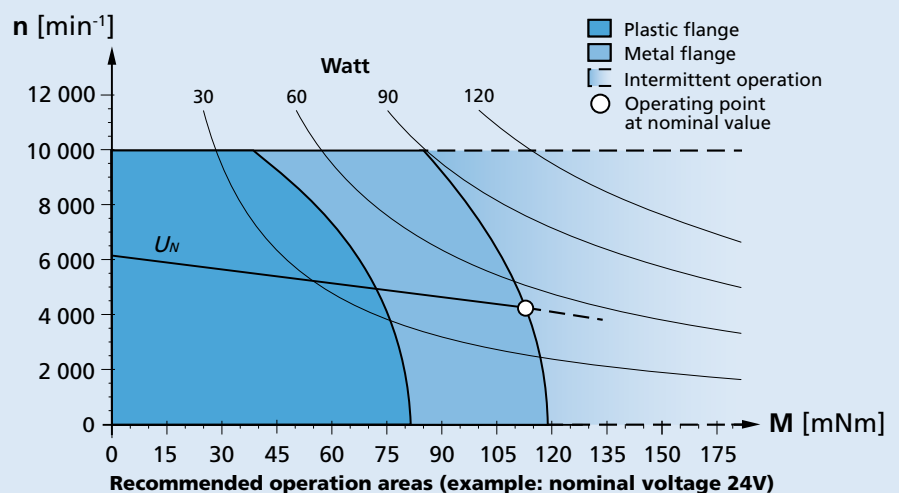
Note: Rated values are measured at nominal voltage and 22°C ambient temperature.

Note:

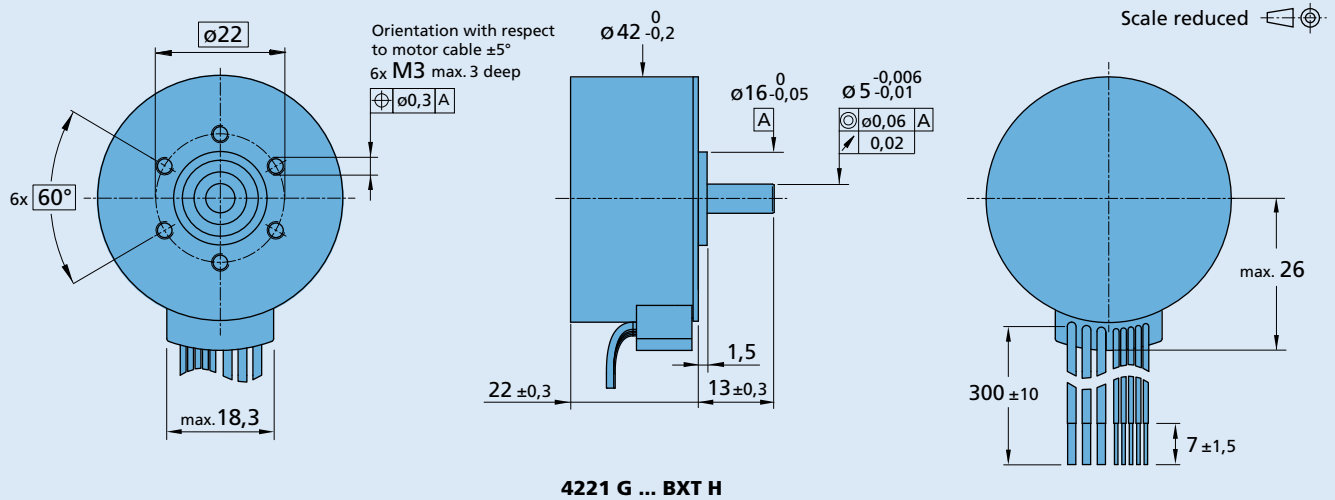
The display shows the range of possible operation points of the drives at a given ambient temperature of 22°C.

The diagram indicates the recommended speed in relation to the available torque at the output shaft. It includes the assembly on a plastic- as well as on a metal flange (assembly method: IM B 5).

The nominal voltage linear slope describes the maximal achievable operating points at nominal voltage. Any points of operation above this linear slope will require a supply voltage $U_{mot} > U_N$.



Dimensional drawing



Option, cable and connection information

Example product designation: **4221G018BXTH-3830**

Option	Type	Description	Connection		
			No.	Function	Colour
3830		Standard cable with connector MOLEX Microfit 3.0, 43025-0800, recommended mating connector 43020-0800	1	Phase C	yellow
			2	Phase B	orange
			3	Phase A	brown
			4	GND	black
			5	U _{DD} (+5V)	red
			6	Hall sensor C	grey
			7	Hall sensor B	blue
			8	Hall sensor A	green
			Standard cable		
			Single wires, material PVC, AWG 20, Phase A/B/C		
			AWG 26, Hall A/B/C, U _{DD} , GND		

Product combination

Precision Gearheads / Lead Screws	Encoders	Drive Electronics	Cables / Accessories
38/1 38/1 S 38/2 38/2 S 42GPT	IE3-1024 IE3-1024 L IEF3-4096 IEF3-4096 L IERS3-500 IERS3-500 L IER3-10000 IER3-10000 L	SC 2804 S SC 5004 P SC 5008 S MC 3603 S MC 5004 P MC 5005 S	To view our large range of accessory parts, please refer to the "Accessories" chapter.

4. *PARAMETRY MOTORU 3216 W009 BXT*

4. Parametry motoru 3216 W009 BXT

Brushless DC-Flat Motors

External rotor technology, with housing

38 mNm
20 W

Series 3216 ... BXT H

Values at 22°C and nominal voltage	3216 W	009 BXT H	012 BXT H	024 BXT H	
1 Nominal voltage	U_N	9	12	24	V
2 Terminal resistance, phase-phase	R	0,55	0,88	3,26	Ω
3 Efficiency, max.	η_{max}	83	84	81	%
4 No-load speed	n_0	6 060	6 230	6 250	min ⁻¹
5 No-load current, typ. (with shaft \varnothing 4 mm)	I_0	0,165	0,126	0,068	A
6 Starting torque	M_A	225	245	263	mNm
7 Speed constant	k_n	691	530	267	min ⁻¹ /V
8 Back-EMF constant	k_E	1,45	1,89	3,75	mV/min ⁻¹
9 Torque constant	k_M	13,8	18	35,8	mNm/A
10 Current constant	k_I	0,0724	0,0555	0,0279	A/mNm
11 Slope of n-M curve	$\Delta n / \Delta M$	27,5	25,9	24,3	min ⁻¹ /mNm
12 Terminal inductance, phase-phase	L	191	331	1 290	μ H
13 Mechanical time constant	τ_m	5,28	4,97	4,66	ms
14 Rotor inertia	J	18,3	18,3	18,3	gcm ²
15 Angular acceleration	α_{max}	123	134	144	$\cdot 10^3$ rad/s ²
16 Operating temperature range:					
– motor		-40 ... +100			°C
– winding, max. permissible		+125			°C
17 Shaft bearings		ball bearings, preloaded			
18 Shaft load max.:					
– with shaft diameter		4			mm
– radial at 3 000 min ⁻¹ (5 mm from mounting flange)		15			N
– axial at 3 000 min ⁻¹ (push / pull)		3			N
– axial at standstill (push / pull)		50			N
19 Shaft play:					
– radial	\leq	0,015			mm
– axial	$=$	0			mm
20 Mass		65,3			g
21 Direction of rotation		electronically reversible			
22 Speed up to	n_{max}	10 000			min ⁻¹
23 Number of pole pairs		7			
24 Hall sensors		digital			
25 Magnet material		NdFeB			
Rated values for continuous operation					
26 Rated torque	M_N	37	38	38	mNm
27 Rated current (thermal limit)	I_N	2,76	2,18	1,1	A
28 Rated speed	n_N	3 400	3 860	4 320	min ⁻¹
29 Rated slope of n-M curve	$\Delta n / \Delta M$	71,9	62,4	50,8	min ⁻¹ /mNm

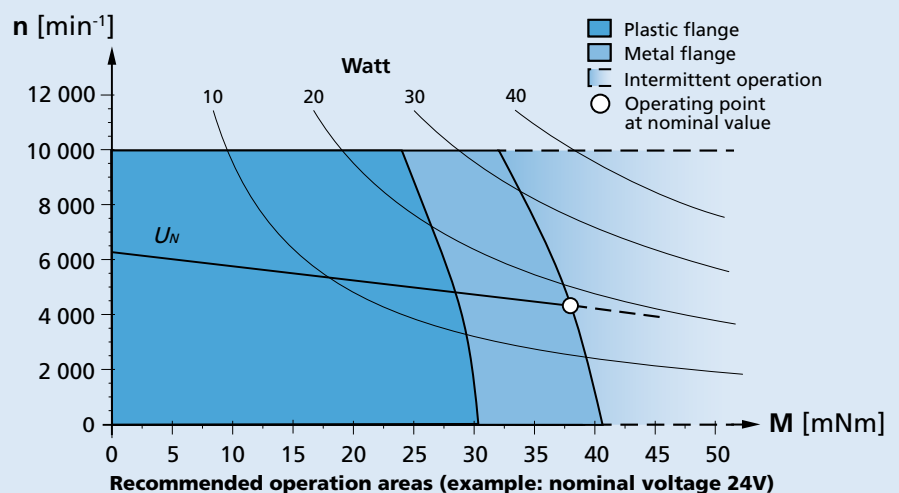
Note: Rated values are measured at nominal voltage and 22°C ambient temperature.

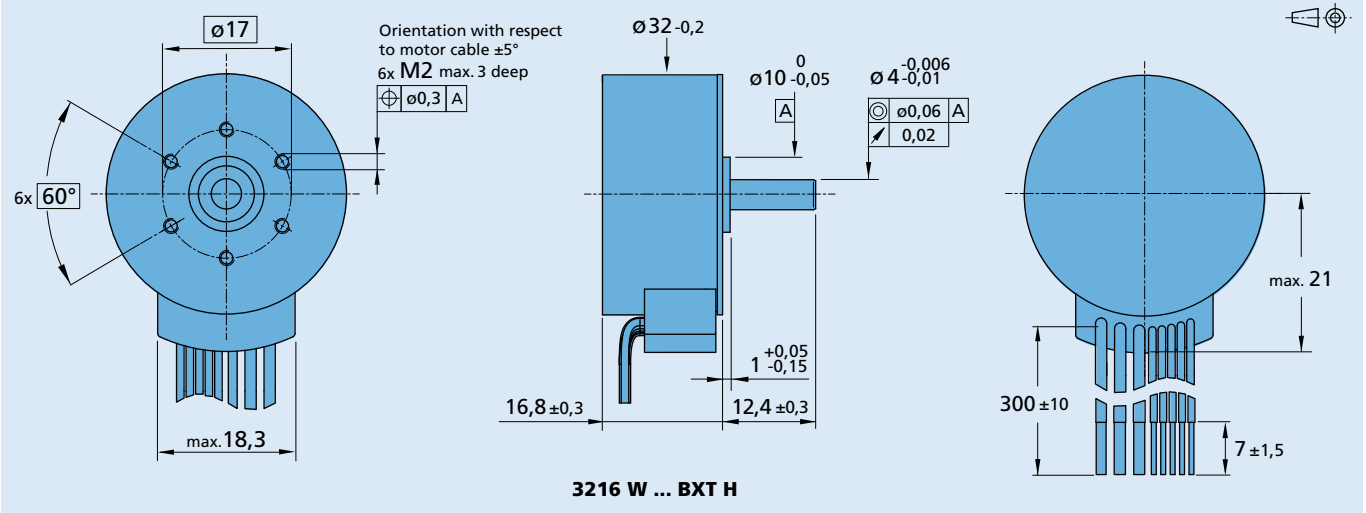
Note:

The display shows the range of possible operation points of the drives at a given ambient temperature of 22°C.

The diagram indicates the recommended speed in relation to the available torque at the output shaft. It includes the assembly on a plastic- as well as on a metal flange (assembly method: IM B 5).

The nominal voltage linear slope describes the maximal achievable operating points at nominal voltage. Any points of operation above this linear slope will require a supply voltage $U_{mot} > U_N$.



Dimensional drawing

Option, cable and connection information

 Example product designation: **3216W012BXTH-3830**

Option	Type	Description	Connection		
			No.	Function	Colour
3830	Connector 	Standard cable with connector MOLEX Microfit 3.0, 43025-0800, recommended mating connector 43020-0800	1	Phase C	yellow
			2	Phase B	orange
			3	Phase A	brown
			4	GND	black
			5	U _{DD} (+5V)	red
			6	Hall sensor C	grey
			7	Hall sensor B	blue
			8	Hall sensor A	green
			Standard cable Single wires, material PVC, AWG 20, Phase A/B/C, AWG 26, Hall A/B/C, U _{DD} , GND		

Product combination

Precision Gearheads / Lead Screws	Encoders	Drive Electronics	Cables / Accessories
22GPT 26A 26/1R 32GPT 32/3R 22L ... ML 22L ... SB 22L ... PB 32L ... TL 32L ... ML 32L ... SB 32L ... PB	IE3-1024 IE3-1024 L IEF3-4096 IEF3-4096 L IERS3-500 IERS3-500 L IER3-10000 IER3-10000 L	SC 2402 P SC 2804 S MC 3603 S MC 5004 P MC 5005 S	To view our large range of accessory parts, please refer to the "Accessories" chapter.

5. Parametry řídicí jednotky s MC 5005

Motion Controllers

V3.0, 4-Quadrant PWM
with RS232, CANopen or EtherCAT interface

MC 5005 S

Values at 22°C		MC 5005 S	
Power supply electronic	U_P	12 ... 50	V DC
Power supply motor	U_{mot}	0 ... 50	V DC
PWM switching frequency	f_{PWM}	100	kHz
Efficiency electronic	η	97	%
Max. continuous output current	I_{cont}	5	A
Max. peak output current ¹⁾	I_{max}	15	A
Standby current for electronic (@ $U_P=24V$)	I_{el}	RS / CO: 0,06 ET: 0,07	A
Operating temperature range		-40 ... +85	°C
Housing material		aluminium, powder-coated	
Mass		RS / CO: 230 ET: 270	g

¹⁾ S2 mode for max. 60s

Interfaces	MC 5005 S RS	MC 5005 S CO	MC 5005 S ET
Configuration from Motion Manager 6.0	RS232 / USB	CANopen / USB	RS232 / USB
Fieldbus	RS232	CANopen	EtherCAT

Basic features

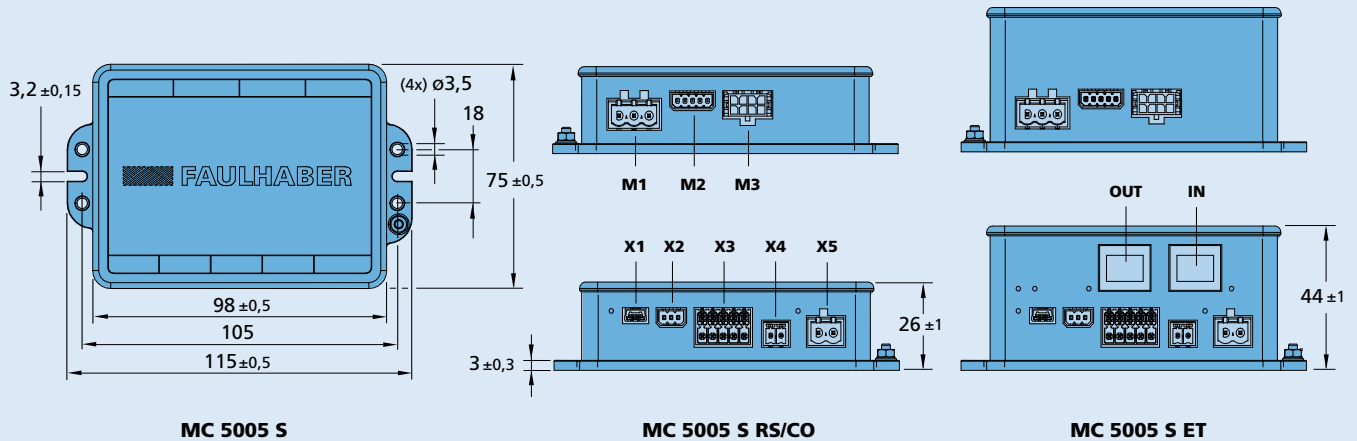
- Control of brushless, DC- and linear motors
- Supported sensor systems: absolute encoders (AES or SSI), incremental encoders (optical or magnetic), Hall sensors (digital or analog), tachometers
- Positioning resolution when using analog Hall sensors as position encoder: 4096 increments per revolution
- 3 digital inputs, 2 digital outputs, 2 analog inputs, flexible configuration
- Setpoint specification via fieldbus, quadrature signal, pulse and direction or analog inputs
- Optional stand-alone operation via application programs in all interface versions

Range of functions

Operating modes	PP, PV, PT, CSP, CSV, CST and homing acc. to IEC 61800-7-201 or IEC 61800-7-301 as well as position-, speed- and torque control via analog setpoint or voltage controller
Speed range for brushless motors with number of pole pairs 1	0 min ⁻¹ ... 30 000 min ⁻¹ with sinusoidal commutation (optionally to 60 000 min ⁻¹ with block commutation)
Application programs	Max. 8 application programs (BASIC), one of which is an autostart function
Additional functions	Touch-probe input, connection of a second incremental encoder, control of a holding brake
Indicator	LEDs for displaying the operating state Trace as recorder (scope function) or logger
Motor types	DC, BL- and linear motors

Dimensional drawing

Scale reduced



Options and connection information

Example product designation: **MC 5005 S RS**

Option	Type	Description	Connection			
			Name	Function	Input/Output	Description
6419	Encoder combination	Integrated terminating resistor for combination with absolute encoder AES-4096 L or AEMT-12/16 L	X1	Configuration interface		USB
			X2	Fieldbus		RS: RS232 CO: CANOpen TTL or PLC level
			X3	Input/Output	DigIn1, DigIn2, DigIn3 DigOut1, DigOut2 AnIn1, AnIn2 U _{out} / GND	max. 0,7A cont. current ± 10V against AGND 5V
			X4	Electronic power supply		
			X5	Motor power supply		
			M1	Motor phases	A, B, C	
			M2	Hall sensors	A, B, C U _{out} / GND	digital or analog 5V
			M3	Encoder	A, \bar{A} , B, \bar{B} , I, \bar{I} EN, \bar{EN} , CLOCK, \bar{CLOCK} , DATA, \bar{DATA} U _{out} / GND	max. 5MHz AES or SSI 5V
			IN	Fieldbus		EtherCAT IN
			OUT	Fieldbus		EtherCAT OUT

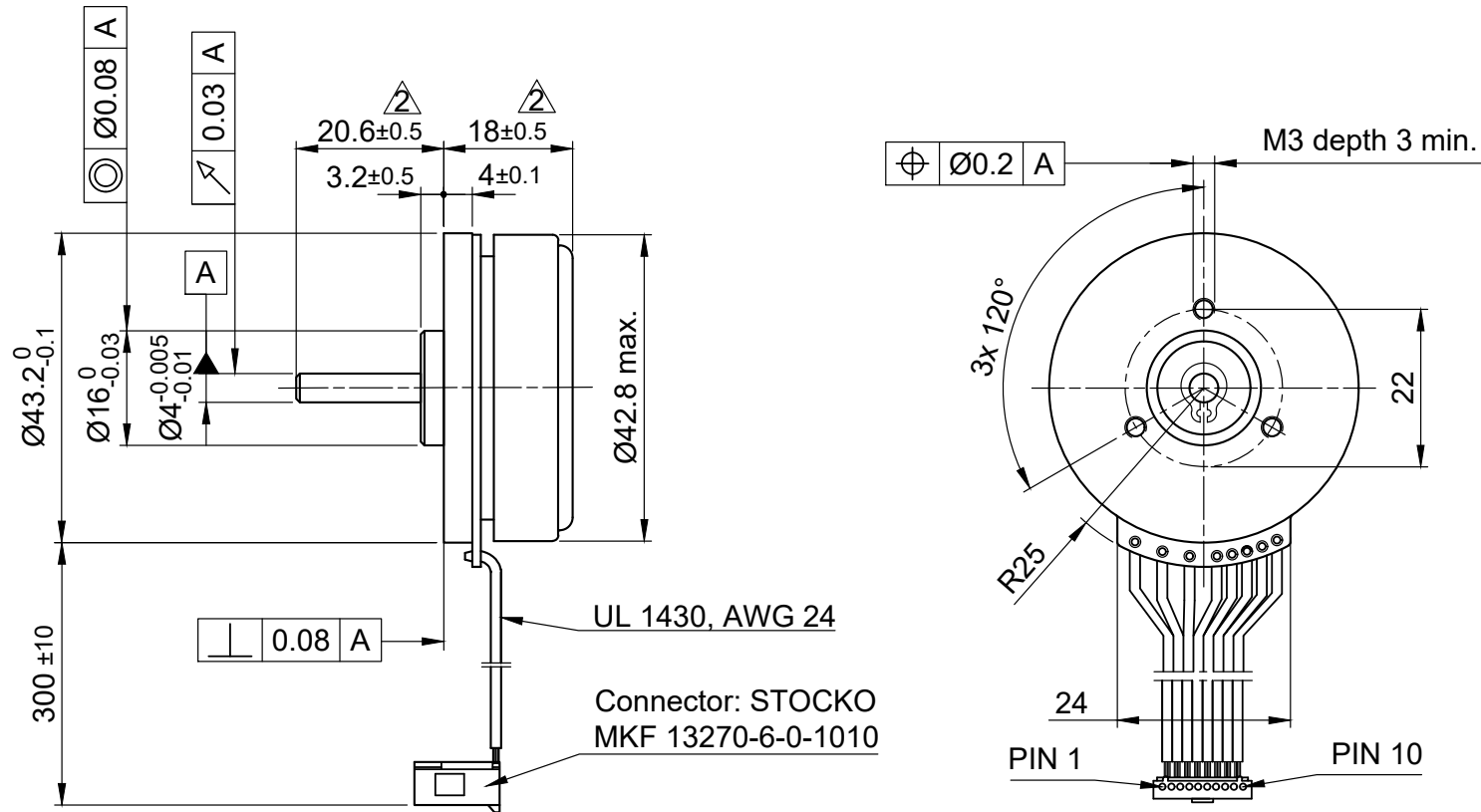
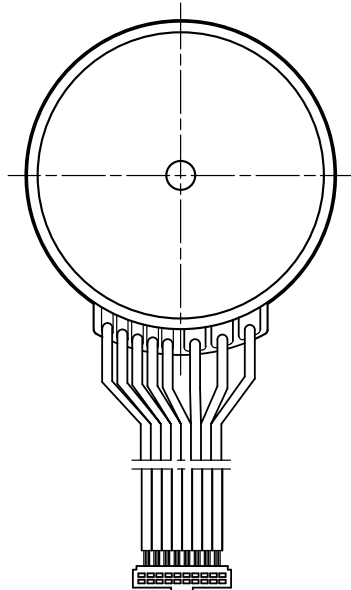
Note: For details on the connection assignment, see device manual for the MC 5005.

Product combination

DC-Motors	Brushless DC-Motors	Linear DC-Servomotors	Cables / Accessories
2237 ... CXR 2342 ... CR 2642 ... CR 2642 ... CXR 2657 ... CR 2657 ... CXR 2668 ... CR 3242 ... CR 3257 ... CR 3272 ... CR	1645 ... BHS 1660 ... BHT 2036 ... B 2057 ... B 2214 ... BXT H 2232 ... BX4 2250 ... BX4 2444 ... B 3056 ... B 3216 ... BXT H 3242 ... BX4 3268 ... BX4 3564 ... B 4221 ... BXT H	LM 1247 ... 11 LM 1483 ... 11 LM 2070 ... 11	<p>An extensive range of accessories is available for the products of the MC 5010 and MC 5005 controller series.</p> <p>Included here are connection cables for controller and motor supply, sensors and interfaces, connector sets for motor- and supply side as well as mechanical components for optional top hat rail mounting.</p> <p>To view our large range of accessory parts, please refer to the „Accessories“ chapter.</p>

6. *PARAMETRY MOTORU DF45S024053-A2*

6. Parametry motoru DF45S024053-A2

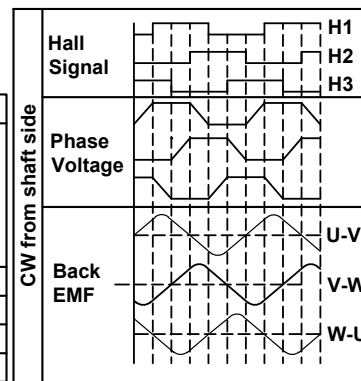
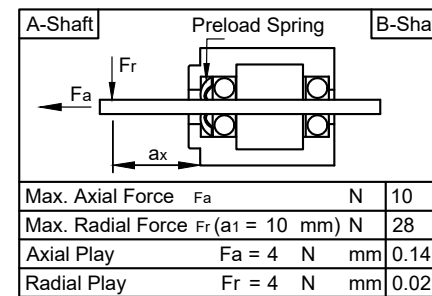


MOTOR SPECIFICATION

No. of Poles		16
Rated Voltage	V DC	24
Current - No Load / Rated / Peak	A	<0.3/ 1.58/ 4.8
Resistance Line to Line	±10% Ω	1.47
Inductance Line to Line (1kHz)	±20% mH	0.61
Torque - Rated / Peak	Nm	0.05 / 0.15
Torque Constant	Nm/A	0.0355
Rated Power	W	30
Speed - No Load / Rated	±10% rpm	6500 / 5000
Rotor Inertia	kg m ²	9.9 x10 ⁻⁶

WIRING DIAGRAM

	PIN	Colour	Function	Lead Gauge
Motor	1	GY	U	UL1430 AWG24
	2	BN	V	
	3	YE	W	
Hall 48 Impl. per Rev.	8	RD	vHall 3.3...18VDC	UL1430 AWG24
	6	BU	H1	
	5	GN	H2	
	7	WH	H3	
	4	BK	GND	



GENERAL MOTOR SPECIFICATION

Ambient Temperature	°C	-20 ... 50
Max. Temperature Rise (at standstill)	°C	80
Max. Ambient Humidity (non condensing)	%	85
Insulation Class		B
Insulation Resistance	MΩ	100
Dielectric Strength (for 1 min - coil to case)	V AC	500

ISO 8015	ISO 1302	ISO 2768 cK	ISO 13715	Weight: 0.08 kg	
			Date	Name	
			Drawn	04.12.2017	Import
			Reviewed	09.06.2020	Knoll_J
			Released	09.06.2020	Knoll_J
02	revise drawing	Schneid_A	10.06.2020	DF45S024050-A2	
REV	Rev. Text	Name	Date		
				03000191	A4 Page 1
				State: For Review	Rev: 02
				CONFIDENTIAL	



7. *PARAMETRY ŘÍDÍCÍ JEDNOTKY CSL3-5*

7. Parametry řídicí jednotky CSL3-5

CSL3-5, CSL3-24

Short instructions	Version 1.0.0
Original: de	Firmware: v2150
Nanotec Electronic GmbH & Co. KG Kapellenstraße 6 85622 Feldkirchen, Germany	Phone: +49 (89) 900 686-0 Fax: +49 (89) 900 686-50 info@nanotec.de

Introduction

The CSL3 is a controller for the *closed loop* operation of BLDC motors. CSL3 supports the velocity and position mode, as well as homing on block.

The operation mode and the target values can be controlled via the four digital inputs, the analog input or the power supply voltage.

There are two variants available, CSL3-5 and CSL3-24, with 5 or 24 V DC respectively. In addition, the controller is equipped with two digital outputs.

Three Hall sensor inputs are used for recording the motor rotor position feedback and velocity measurement.

The configuration can be done using Modbus RTU with the software *Plug & Drive Studio 3*, via a UART interface with a 3.3 V signal level.

Copyright

© 2018 – 2021 Nanotec Electronic GmbH & Co. KG. All rights reserved.



Intended use

The CSL3 serves to control BLDC motors and is used as a component in drive systems in a wide range of industrial applications.

Use the product as intended within the limits defined in the technical data (in particular, see **Permissible operating voltage**) and the approved **Environmental conditions**.

Under no circumstances may this Nanotec product be integrated as a safety component in a product or system. All products containing a component manufactured by Nanotec must, upon delivery to the end user, be provided with corresponding warning notices and instructions for safe use and safe operation. All warning notices provided by Nanotec must be passed on directly to the end user.

Target group and qualification

The product and this documentation are directed towards technically trained specialists staff such as:

- Development engineers
- Plant engineers
- Installers/service personnel
- Application engineers

Only specialists may install, program and commission the product. Specialist staff are persons who

- have appropriate training and experience in working with motors and their control,
- are familiar with and understand the content of this technical manual,
- know the applicable regulations.

Warranty and disclaimer

Nanotec assumes no liability for damages and malfunctions resulting from installation errors, failure to observe this manual or improper repairs. The selection and use of Nanotec products is the responsibility of the plant engineer or end user. Nanotec accepts no responsibility for the integration of the product in the end system.

Our general terms and conditions at www.nanotec.com apply.



NOTICE

Changes or modifications to the product are not permitted.

EU directives for product safety

The following EU directives were observed:

- RoHS directive (2011/65/EU, 2015/863/EU)

Other applicable regulations

In addition to this technical manual, the following regulations are to be observed:

- Accident-prevention regulations
- Local regulations on occupational safety

Safety and warning notices

NOTICE



- Damage to the controller.
- Changing the wiring during operation may damage the controller.
- Only change the wiring in a de-energized state. After switching off, wait until the capacitors have discharged.

NOTICE



Fault of the controller due to excitation voltage of the motor!
Voltage peaks during operation may damage the controller.
► Install suitable circuits (e.g., charging capacitor) that reduce voltage peaks.

NOTICE



Damage to the electronics through improper handling of ESD-sensitive components!
The device contains components that are sensitive to electrostatic discharge. Improper handling can damage the device.
► Observe the basic principles of ESD protection when handling the device.

NOTICE



- There is no polarity reversal protection.
- Polarity reversal results in a short-circuit between supply voltage and GND (earth) via the power diode.
- Install a line protection device (fuse) in the supply line.

Technical details and pin assignment

Environmental conditions

Environmental condition	Value
Protection class	No IP protection
Ambient temperature (operation)	-10 ... +40°C
Air humidity (non-condensing)	0 ...95 %
Altitude of site above sea level (without drop in performance)	1500 m
Ambient temperature (storage)	-25 ... +85°C

Overtemperature protection

Above a temperature of approx. 90°C on the power board, the power part of the controller switches off and the error bit is set in the **1001h Error Register**. After cooling down to approx. 75°C and resetting the error via bit 8 in **6040h Control Word** or powering on/off, the controller functions again normally.

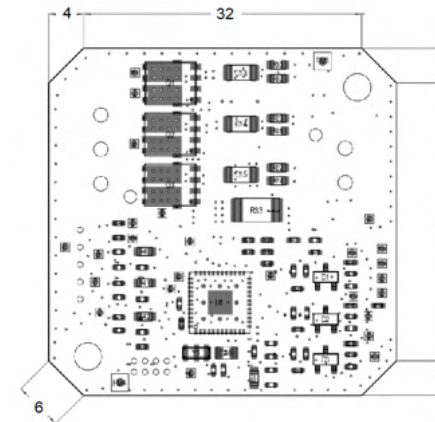
Electrical properties and technical data

Property	Description / value
Operating voltage	10 ... 30 V DC
Rated current	3 A _{RMS}
Peak current	9 A _{RMS} for max. 5 seconds
Commutation	BLDC motor closed-loop with Hall sensor
Operating modes	<i>Velocity Mode, Position Mode, Homing on Block</i>
Set value setting	Via the <i>supply voltage, the digital inputs or the analog input</i>
Interfaces	UART 3.3 V
Inputs	<ul style="list-style-type: none"> • 4 digital inputs: <ul style="list-style-type: none"> - 5 V for the CSL3-5 variant - 24 V for the CSL3-24 variant • 1 analog input, 12-bit resolution, 0-10 V

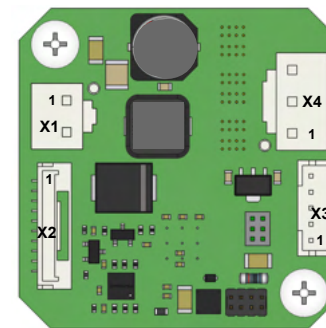
Property	Description / value
Outputs	2 digital outputs, high-side switch (output voltage corresponds to the supply voltage)
Protection circuit	<p>Overvoltage and undervoltage protection</p> <p>Overtemperature protection (> 90° Celsius on the power board)</p> <p>Polarity reversal protection: no polarity reversal protection, a line protection device (fuse) is therefore necessary in the supply line. The values of the fuse are dependent on the application and must be dimensioned</p> <ul style="list-style-type: none"> • greater than the maximum current consumption of the controller • less than the maximum current of the voltage supply. <p>If the fuse value is very close to the maximum current consumption of the controller, a medium / slow tripping characteristics should be used.</p>

Dimensioned drawing

All dimensions are in millimeters.



Pin assignment



X1 — voltage supply

Connection for the main supply

Type: JST B2P-VH

Suitable Nanotec cable: ZK-VHR-2-500 (not included in the scope of delivery)

Voltage source

The operating or supply voltage supplies a battery, a transformer with rectification and filtering, or a switching power supply.

NOTICE



EMC: For a DC power supply line longer than 30 m or when using the motor on a DC bus, additional interference-suppression and protection measures are necessary.

- An EMI filter is to be inserted in the DC supply line as close as possible to the controller/motor.
- Long data or supply lines are to be routed through ferrites.
- A capacitor of at least 4700 µF is to be connected to the supply voltage (parallel) as close to the controller as possible.

Pin assignment

Pin	Function	Note
1	+Ub	10 ... 30 V DC
2	GND	

Permissible operating voltage

The maximum operating voltage is 30 V DC. If the input voltage of the controller exceeds the threshold value set in **2034h**, the motor is switched off and an error triggered.

The minimum operating voltage is 10 V DC. If the input voltage of the controller falls below 8 V, the motor is switched off and an error triggered.

A charging capacitor of at least 4700 µF / 50 V (approx. 1000 µF per ampere rated current) must be connected in parallel to the supply voltage to avoid exceeding the permissible operating voltage (e.g., during braking).

X2 – inputs and outputs, communication

Type: JST BM10B-GHS-TBT

Suitable Nanotec cable: ZK-GHR10-500-S-COM (not included in the scope of delivery), for the converter ZK-RS232-USB-1.

Pin	Function	Note
1	Digital input 1	Max. 1 KHz
2	Digital input 2	Max. 1 KHz
3	Digital input 3	Max. 1 KHz
4	Digital input 4	Max. 1 KHz
5	Digital output 1	Positive switching (<i>High-Side-Switch</i>), the output voltage corresponds to the supply voltage Max. 50 mA / 1 KHz
6	Digital output 2	Positive switching (<i>High-Side-Switch</i>), the output voltage corresponds to the supply voltage Max. 50 mA / 1 KHz
7	Analog input 1	12 bit, 0-10 V
8	UART Tx	3.3 V UART
9	UART Rx	3.3 V UART
10	GND	

For the digital inputs of the variant CSL3-5, the following switching thresholds apply:

Max. Voltage	Switching thresholds	
	On	Off
5 V	> 2 V	< 0.8 V

For the digital inputs of the variant CSL3-24, the following switching thresholds apply:

Max. Voltage	Switching thresholds	
	On	Off
30 V	> 9 V	< 3.7 V

X3 – Hall sensor

Type: JST B5B-PH

Suitable Nanotec cable: ZK-PHR-5-500 (not included in the scope of delivery)

Pin	Function	Note
1	H1	5 V signal
2	H2	5 V signal

Pin	Function	Note
3	H3	5 V signal
4	+5 V DC	Supply voltage for hall sensors
5	GND	

X4 – motor connection

Type: JST B3P-VH

Suitable Nanotec cable: ZK-VHR-3-500 (not included in the scope of delivery)

Pin	BLDC function
1	U
2	V
3	W

Commissioning

The *Plug & Drive Studio 3* software offers you an option for performing the configuration and adapting the controller to the connected motor. A project template is included.

Observe the following note:

NOTICE

EMC: Current-carrying cables – particularly around supply and motor cables – produce electromagnetic alternating fields. These can interfere with the motor and other devices.

Suitable measures may be:

- ▶ Use shielded cables and earth the cable shielding on both ends over a short distance.
- ▶ Keep power supply and motor cables as short as possible.
- ▶ Use cables with cores in twisted pairs.
- ▶ Earth motor housing with large contact area over a short distance.
- ▶ Lay supply, motor and control cables separately.

1

Configuration via UART

Configure the controller via the UART interface with a 3.3 V signal level and the following settings:

- Baud rate 256000
- 8 data bits
- Parity: even
- 1 stop bit
- No data flow control

For communication between controller and PC, you need a USB-UART converter with 3.3 V signal level (e.g., ZK-RS232-USB-1 from Nanotec).

Setting the motor data

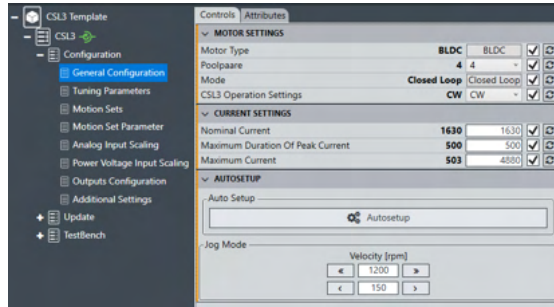
Prior to commissioning, the motor controller requires a number of values from the motor data sheet.

- Number of pole pairs: Object **2030**, 00_n (pole pair count) The number of motor pole pairs is to be entered here. With BLDC motors, the number of pole pairs is specified directly in the motor data sheet.
- Maximum motor speed: Object **2032**, 00_n (Maximum Speed) The maximum motor speed (see motor data sheet) is to be entered here.
- Object **2031**, 00_n Maximum permissible motor current (rms value) in mA (see motor data sheet)
- Object **203B**, 01_n: Rated current of the motor (rms value) in mA (see motor data sheet), limited by **2031**.
- Object **203B**, 02_n Maximum duration of the maximum current in ms (for initial commissioning, Nanotec recommends a value of 100 ms; this value is to be adapted later to the specific application).

NOTICE

When using the control modes, note that the value of the rate current is set via the digital inputs, to one of the pre-set values in object **2463h** Pre-set Current.

The module *General Configuration* of the project template in *Plug & Drive Studio 3* bundles up all relevant parameters:



Auto setup

To determine a number of parameters related to the motor and the connected Hall sensors, you must perform an auto setup.

TIP

As long as the motor connected to the controller or the sensors for feedback (Hall sensors) are not changed, auto setup is only to be performed once during initial commissioning.

NOTICE

Note the following prerequisites for performing the auto setup:

- ▶ The motor must be load-free.
- ▶ The motor must not be touched.
- ▶ The motor must be able to turn freely in any direction.

1

Execution

The module *General Configuration* of the project template in *Plug & Drive Studio 3* offers a special control to execute the *auto setup*.

Setting control mode

You can use one of the pre-programmed control modes to operate the motor in **Profile Velocity** or **Profile Position** mode. The mode selection takes place via the digital inputs.

The controller offers the following control modes:

- **Profile Velocity** with target speed via digital inputs
- **Profile Velocity** with Target speed via analog input
- **Profile Velocity** with Target speed via supply voltage
- **Profile Position** with target position via digital inputs
- **Homing on Block**

To activate the use of the control modes, set bit 0 in **2481h** CSL3 Operation Settings to "1".

In the object **2472h** Digital Inputs Mapping, you define which function the four digital inputs have. Via the inputs you can select the mode and the corresponding sources for the target values.

Each subindex corresponds to one of the combinations of the four inputs, from 0000_n (no input high to 1111_n (all inputs high). The 16 bits in each subindex have the following meaning:

15	14	13	12	11	10	9
Pos Source			Dec Source		Acc Source	
8	7	6	5	4	3	2
Curr Source			Vel Source		Op Mode	

Op Mode: operation mode

To select the mode, set following bits in the corresponding subindex accordingly:

Bits 0...2 in 2472 _n :0x _n	Operation Mode
000	No operation (to introduce a break between two relative positionings for example)
001	OFF / Clear Error
010	STOP
011	Velocity Mode, positive direction
100	Velocity Mode, negative direction
101	Homing on Block
110	Position, relative
111	Position, absolute

Vel Source: source of velocity

To select the source, set following bits in the corresponding subindex accordingly:

Bits 3..5 in 2472 _n :0x _n	Velocity Source
000	2462 _n :01 _n
001	2462 _n :02 _n
010	2462 _n :03 _n
011	2462 _n :04 _n
100	2462 _n :05 _n
101	Velocity is controlled by analog input, see object 2454_n
110	Velocity is controlled by supply voltage, see object 2454_n
111	Last velocity is hold (eg. when analog input should also be used for current setting)

Curr Source: source of motor current

To select the source, set following bits in the corresponding subindex accordingly:

Bits 6..8 in 2472 _n :0x _n	Current Source
000	2463 _n :01 _n
001	2463 _n :02 _n
010	2463 _n :03 _n
011	2463 _n :04 _n
100	2463 _n :05 _n
101	Current is controlled by analog input, see object 2454_n
110	Current is controlled by supply voltage, see object 2454_n
111	Last current is hold (eg. when analog input should also be used for velocity setting)

Acc Source: source of acceleration ramp

To select the source, set following bits in the corresponding subindex accordingly:

Bits 9 and 10 n 2472 _n :0x _n	Acceleration Source
00	2464 _n :01 _n
01	2464 _n :02 _n
10	2464 _n :03 _n
11	2464 _n :04 _n

Dec Source: source of deceleration ramp

To select the source, set following bits in the corresponding subindex accordingly:

Bits 11 and 12 in 2472 _n :0x _n	Deceleration Source
00	2465 _n :01 _n
01	2465 _n :02 _n
10	2465 _n :03 _n
11	2465 _n :04 _n

Pos Source: source of target position

To select the source, set following bits in the corresponding subindex accordingly:

Bits 13...15 in 2472 _n :0x _n	Position Source
000	2466 _n :01 _n
001	2466 _n :02 _n
010	2466 _n :03 _n
011	2466 _n :04 _n
100	2466 _n :05 _n
101	2466 _n :06 _n
110	2466 _n :07 _n
111	2466 _n :08 _n

Configuration example

In this example, the motor is controlled in the mode *Profile Velocity* via inputs 1 and 2.

- If both inputs are low, the motor is powered off (OFF). If possible, all occurred errors are reset.
- If only input 1 is high, the motor runs in the positive direction with velocity Vel1 (**2462_n:01_n**).
- If only input 2 is high, the motor runs in the negative direction with velocity Vel2 (**2462_n:02_n**).
- If both inputs are high, the motor decelerates with Dec2 (**2465_n:02_n**) and stays powered on with the holding current Curr2 (**2463_n:02_n**).

Inputs	Subindex Value in Mode of 2472 _n Subindex		
Din2	Din1		
0	0	01 _n	1 OFF
0	1	02 _n	3 Velocity Mode CW, Vel1, Curr1, Dec1, Acc1
1	0	03 _n	12 Velocity Mode CCW, Vel2, Curr1, Dec1, Acc1
1	1	04 _n	2114 STOP, Curr2, Dec2

You can save the configuration by writing the value "65766173_n" in **1010_n:01_n**, or via *Plug & Drive Studio 3*.

In order to carry out this configuration in *Plug & Drive Studio 3* proceed as follows:

1. Open the module *General Configuration* of the project template
2. Choose the corresponding mode and the parameters for the first four motion sets as follows:



3. Transfer the values to the controller by clicking *Set* (the check next to each parameter needs to be set);
4. Store the values to the controller by clicking *Store* (the check next to each parameter needs to be set);