

Fakulta elektrotechnická
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Návrh a realizace olejového chlazení elektromotoru

Pracoviště: Regionální inovační centrum elektrotechniky
Číslo dokumentu: 22190 – 008 – 2020
Typ zprávy: Výzkumná zpráva
Řešitelé: Zdeněk Frank, Jan Laksar
Vedoucí projektu: Jan Laksar
Počet stran: 18
Datum vydání: 13.5.2020
Oborové zařazení: 2.2 Electrical engineering, Electronic engineering,
Information engineering - Electrical and electronic
engineering

Zadavatel / zákazník:

Zpracovatel / dodavatel:

Západočeská univerzita v Plzni
Regionální inovační centrum
elektrotechniky
Univerzitní 8
306 14 Plzeň

Kontaktní osoba:

Jan Laksar
tel. 377634474
laksar@rice.zcu.cz

**Tato zpráva vznikla s podporou: TAČR TN01000026 Národní centrum
kompetence Josefa Božka pro pozemní dopravní prostředky a v rámci
projektu SGS-2018-009: Výzkum a vývoj perspektivních technologií v
elektrických pohonech a strojích III**

Anotace

Tato zpráva se zabývá návrhem a realizací chladicího olejového okruhu pro chlazení elektromotoru. Olej zároveň plní funkci elektroizolační, tudíž je použit transformátorový olej o nízké viskozitě.

Klíčová slova

Chlazení, olej, elektromotor

Název zprávy v anglickém jazyce / Report title

Design and realization of an oil cooling system of electromotor

Anotace v anglickém jazyce / Abstract

This report deals with the design and realization of an oil circuit to the cooling of an electromotor. The oil also acts as an electro-insulating medium; therefore the transformer oil with small dynamic viscosity is used.

Klíčová slova v anglickém jazyce / Keywords

Cooling, oil, electric motor

Obsah

1	ÚVOD	4
2	POŽADAVKY A DEFINICE PRVKŮ CHLADICÍHO OKRUHU	5
2.1	POŽADAVKY NA CHLAZENÍ ELEKTROMOTORU YASA	5
2.2	PRVKY CHLADICÍHO OKRUHU	6
3	REALIZACE A OVĚŘENÍ CHLADICÍHO OKRUHU	8
3.1	LIMITNÍ HODNOTY ČERPADLA A ČIDEL, NAPÁJENÍ A ODEČET ZMĚŘENÝCH HODNOT	10
3.2	PROVOZNÍ ZKOUŠKA	11
4	ZÁVĚR	12
5	PŘÍLOHY	13
	PŘÍLOHA 1 – TRANSFORMÁTOROVÝ OLEJ NYTRO LYRA X	13
	PŘÍLOHA 2 – TLAKOVÁ ZTRÁTA HADIC NA 30 M PROTÉKANÝCH VODOU	15
	PŘÍLOHA 3 – PŘEHLED POUŽITÝCH KOMPONENT	16

1 Úvod

Pro testování zakoupeného elektromotoru YASA P400RS [1] bylo nutné sestavit okruh olejového chlazení. Cílem této zprávy je shrnout požadavky na chlazení daného elektromotoru a technické parametry jednotlivých komponent chladicího okruhu. Je vytvořen seznam všech prvků chlazení včetně čidel, popsáno jejich zapojení a odečítání hodnot a definovány limitní stavy chlazení.

2 Požadavky a definice prvků chladicího okruhu

Elektromotor YASA P400RS je trakční motor s vysokou hustotou výkonu, které je možné dosáhnout intenzivním chlazením statorových cívek. Motor je axiální konstrukce a cívky jsou dle výrobce v přímém kontaktu s chladicím médiem. Olej tak neslouží pouze k odvodu tepla, ale plní také funkci izolační.

2.1 Požadavky na chlazení elektromotoru YASA

Dle výrobce je motor schopen dosáhnout momentu 370 Nm a výkonu až 160 kW. Hodnota trvalého výkonu je závislá na druhu chlazení a rychlosti průtoku oleje. Pokud je výrobcem upravena konstrukce a jsou přidány ventilační kanály pro vzduchové chlazení rotoru, může být trvalý výkon až 100 kW. Pokud je použito pouze olejové chlazení statoru, uvádí výrobce maximální trvalý výkon 60 kW při rychlosti proudění oleje 20 l/min. [1] Požadavky na chlazení motoru jsou shrnuty v Tab. 1.

Tab. 1: Požadavky na chlazení udávané výrobcem

Parametr	Hodnota	Poznámka
Chladicí medium	Olej	Dle seznamu schválených olejů.
Filtr chladicího okruhu	Typicky 150 μm	Všechn magnetický materiál musí být zachycen
Maximální tlak oleje na vstupu	1 Bar	Tlaková ztráta uvnitř stroje je 0,25 Bar při 12 l/min a 20 °C 0,5 Bar při 20 l/min a 20 °C
Minimální průtok	12 l/min	
Typický průtok	12 – 20 l/min	
Typické množství odvedeného odpadního tepla	4 kW	
Typická vstupní teplota oleje	65 °C	

Jako první bod bylo nutné zvolit vhodný olej. Z oficiálního seznamu povolených druhů oleje (viz Obr. 2.1) byly však po upřesnění od výrobce povoleny pouze dva: Opticool H a Shell Diala S4 ZX-I. Opticool H má však příliš nízkou viskozitu (3,7 mm²/s při teplotě 40 °C) a bylo by problematické najít vhodné čerpadlo. Nakonec byla zvolena alternativa oleje Shell Diala S4 ZX-I a to osvědčený na fakultě i v průmyslu transformátorový olej Nytro Lyra X (viz Příloha 1). Olej se vyznačuje velmi dobrým přestupem tepla, vysokou elektrickou pevností a dobrými nízkoteplotními vlastnostmi. Typická hodnota kinematické viskozity oleje je 9,6 mm²/s při teplotě 40 °C.

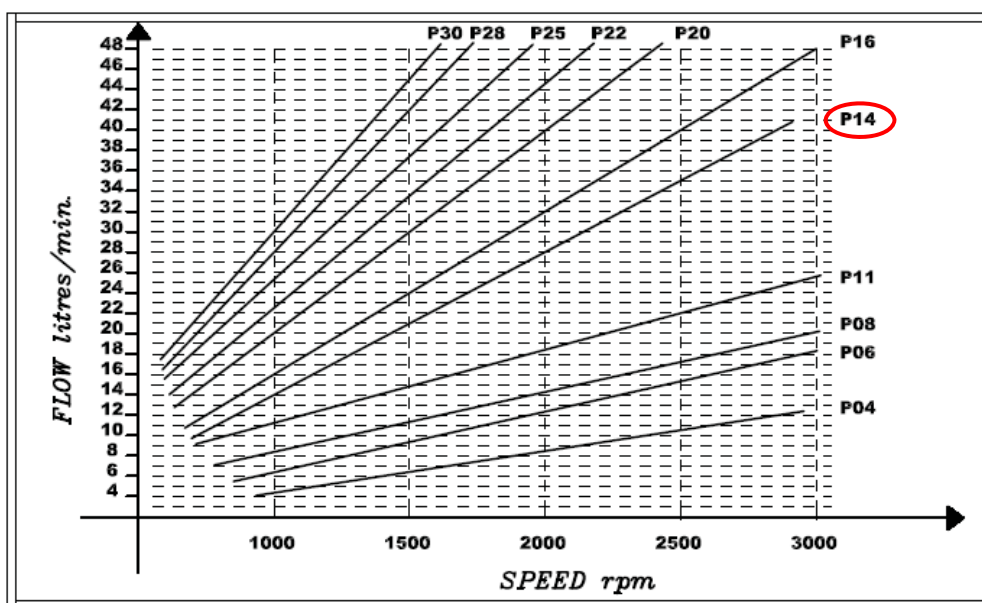
Ref.	Dielectric Coolant
1	Opticool H *
2	Agip VG32
3	Idemitsu Super Hydro A, 46A
4	Nynas Nytro 10XN
5	Opticool A
6	Opticool
7	Panolln Trafosynth
8	Shell Diala S4 ZX-I
9	Shell Tellus S4 ME

Obr. 2.1: Seznam povolených olejů udávaný výrobcem

2.2 Prvky chladicího okruhu

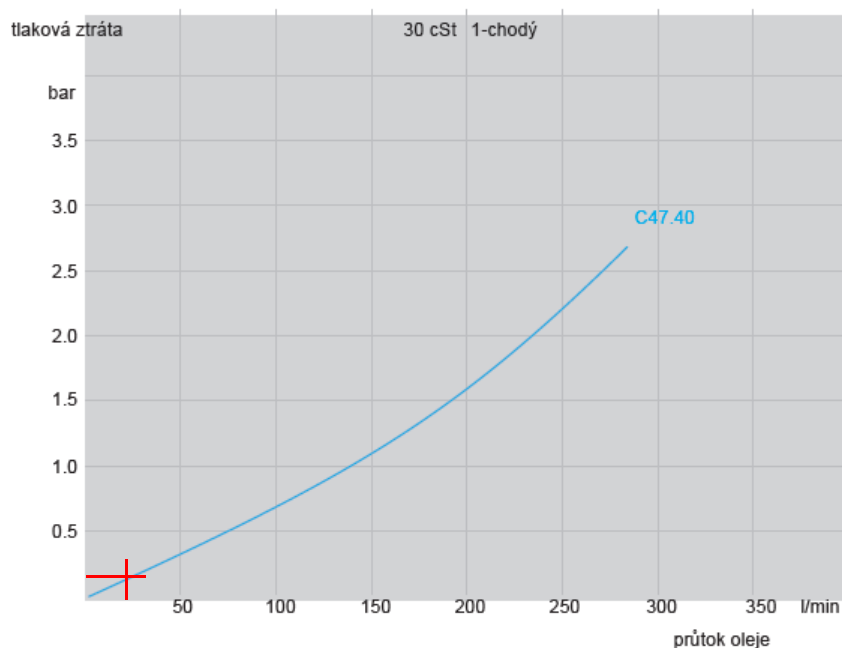
Chladicí okruh sestává z čerpadla, vzduchového chladiče, nádoby na olej, čidel teploty a tlaku a filtru.

Čerpadlo musí být schopné pracovat s olejem o nízké viskozitě, proto bylo možné použít pouze zubové nebo vlnové čerpadlo. Bylo zvoleno zubové čerpadlo OT200 P14 D od společnosti Brevini poháněné asynchronním motorem se 4 póly o výkonu 750 W. Pro správnou funkci čerpadla je doporučená minimální viskozita oleje $10 \text{ mm}^2/\text{s}$. Bude tedy nutné pro olej protékající čerpadlem dodržet provozní teplotu menší než 40°C . Proto je čerpadlo umístěno před samotný motor, kde lze očekávat nárůst teploty oleje. Při předpokládané pracovní rychlosti 1450 ot/min je průtok čerpaného oleje přibližně 20 l/min (viz Obr. 2.2, pro čerpadlo P14).



Obr. 2.2: Provozní charakteristika čerpadla

Pro chlazení byl zvolen vzduchový chladič C47.40-4D-100 s ventilátorem poháněný třífázovým asynchronním motorem se 4 póly o výkonu 370 W. Maximální dovolená teplota chlazeného oleje je 120 °C a tlak 26 bar, což jsou hodnoty vysoko přesahující předpokládané provozní hodnoty. Dle Obr. 2.3 je tlaková ztráta na chladiči při průtoku oleje 20 l/min o viskozitě 30 mm²/s přibližně 0,15 Bar. Pro námi použitý olej bude tlaková ztráta tedy výrazně menší.



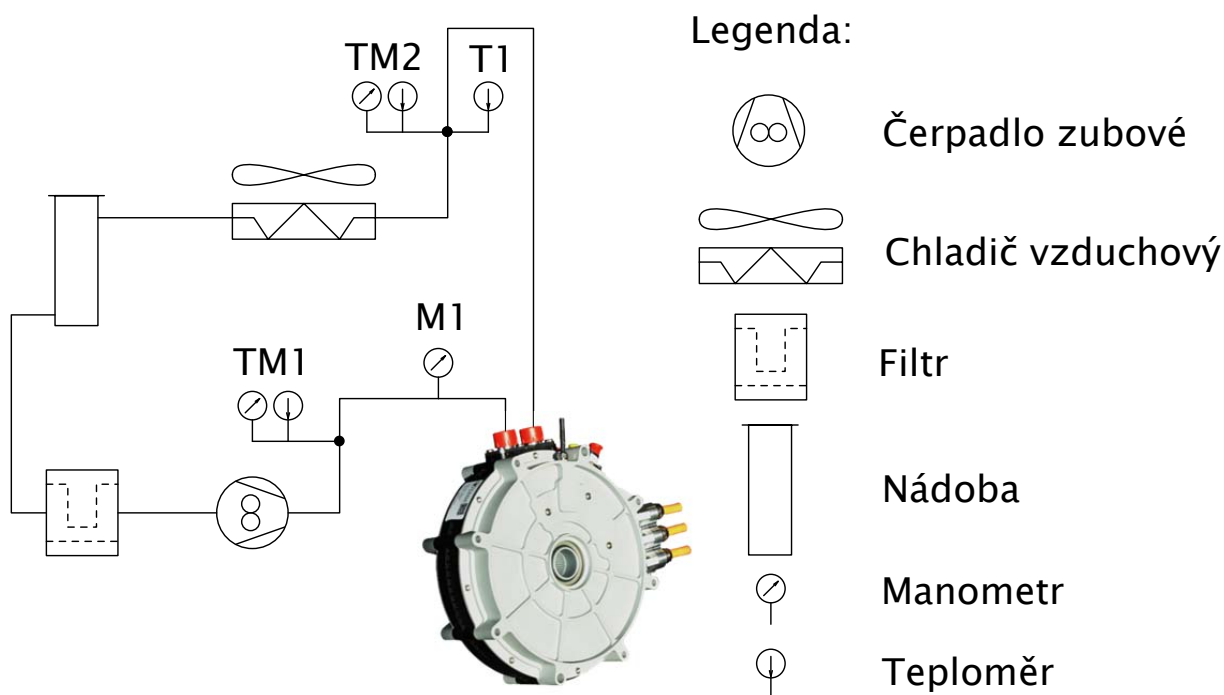
Obr. 2.3: Tlaková ztráta chladiče v závislosti na průtoku oleje

Olejový filtr byl vybrán od společnosti Sofina, typ CCA 152 CV1 s porozitou 25 µm, maximální teplotou 110 °C a tlakem 12 Bar. Ten velmi dobře splňuje požadavky na filtraci.

Pro spojovací materiál (hadice) byla nalezena tlaková ztráta pouze pro hadice na vodu (viz Příloha 2). Ta je pro hadice o průměru 1/2" při průtoku 20 l/min 2,1 Bar na 30 m hadice. Při předpokladu stejného tlakového úbytku hadice protékané olejem bude při 7 m hadic celková tlaková ztráta 0,5 bar.

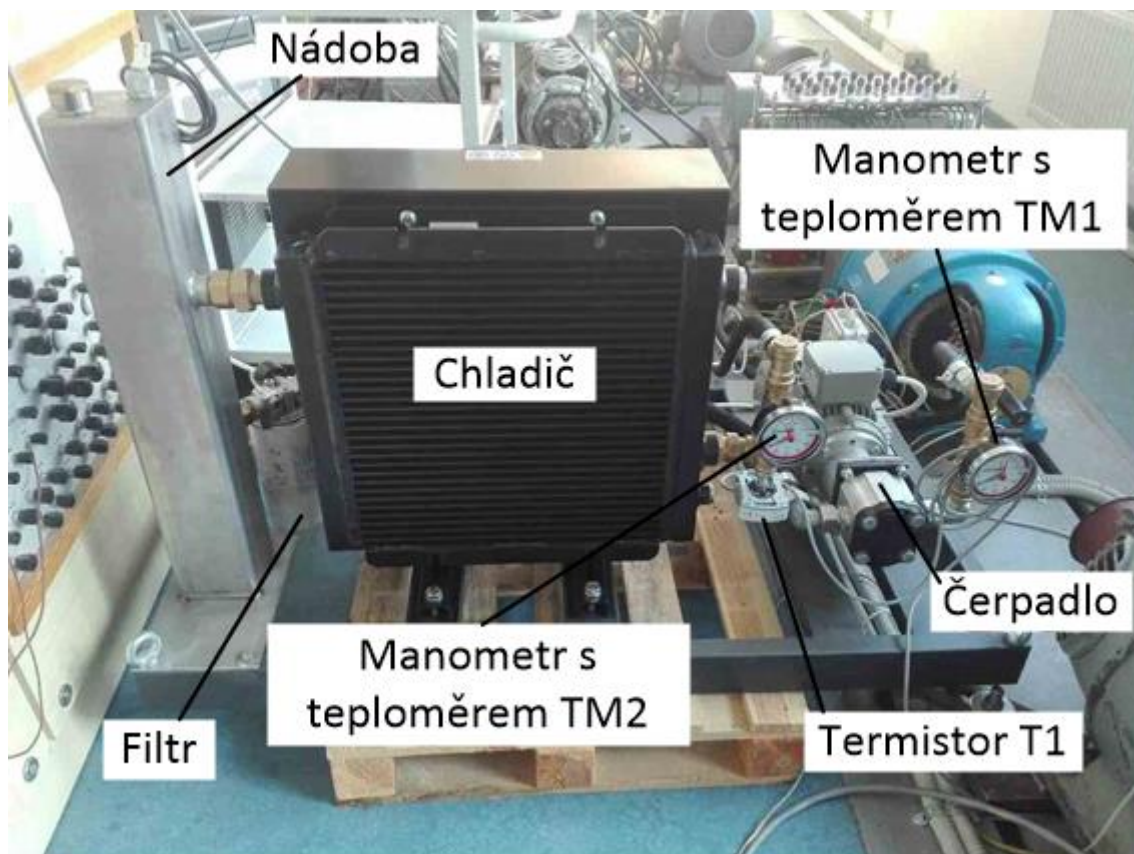
3 Realizace a ověření chladicího okruhu

Schéma celého chladicího okruhu je zobrazeno na Obr. 3.1. Pro správný chod čerpadla je nutné mít teplotu čerpaného oleje co nejnižší. Z toho důvodu bylo čerpadlo umístěno mezi chladič a zdroj tepla – elektromotor. Tím je pevně dáno uspořádání okruhu. Celé chlazení kromě elektromotoru je umístěno na kompaktním rámu o velikosti 110x63 cm pro snadnou manipulaci.



Obr. 3.1: Schéma chladicího okruhu

Na Obr. 3.2 a Obr. 3.3 je zobrazeno foto celého chladicího okruhu s vyznačením všech částí popsanych na schématu na Obr. 3.1.

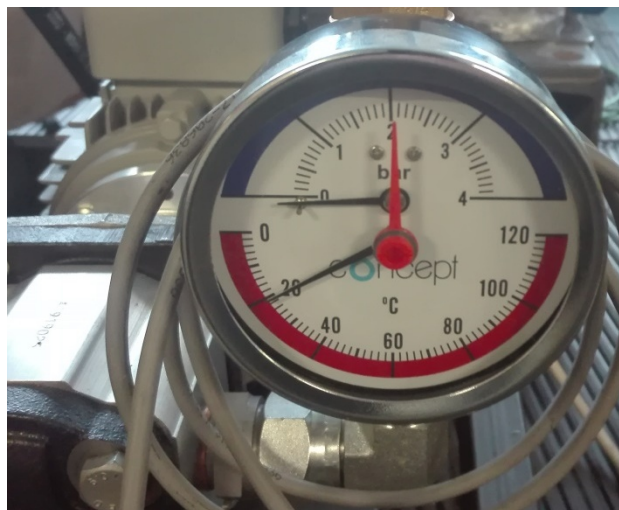


Obr. 3.2: Foto chladicího okruhu, 1. část



Obr. 3.3: Foto chladicího okruhu, 2. část

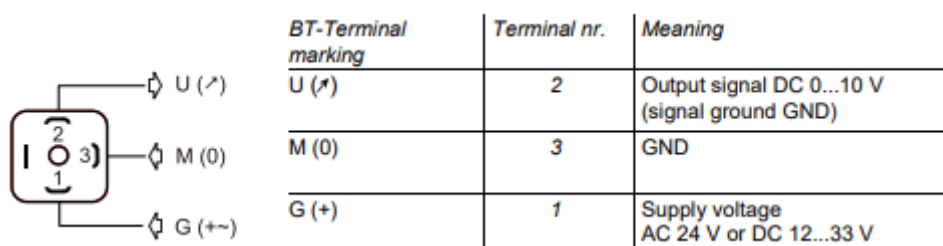
Pro možnost okamžitého odečtu teploty a tlaku na výstupu z čerpadla a na vstupu do chladiče je okruh osazen analogovými manometry s teploměrem TM1 a TM2, viz Obr. 3.4. Manometr M1 měřící tlak přímo na vstupu do chlazeného elektromotoru je digitální čidlo tlaku QBE2003-P-4 od společnosti Siemens pro možnost dálkového odečtu tlaku ve formě stejnosměrného napětí 0-10 V pro měřený tlak 0-4 Bary. Teploměr T1 je pak termistor PT100.



Obr. 3.4: Manometr s teploměrem

3.1 Limitní hodnoty čerpadla a čidel, napájení a odečet změřených hodnot

Z hlediska bezpečnosti zkoušeného stroje je nejdůležitějším parametrem vstupní tlak měřený pomocí digitálního čidla M1, který nesmí překročit 1 Bar. Senzor QBE2003-P4 může být napájen střídavým napětím 24 V nebo stejnosměrným napětím 12-33 V dle schématu na Obr. 3.4. **Výstupní stejnosměrné napětí nesmí překročit hodnotu 2,5 V, která odpovídá tlaku 1 Bar.**



Obr. 3.5: Zapojení tlakového čidla QBE2003-P

Dostatečný odvod tepla je zajištěn pomocí oleje, jehož rychlost průtoku by neměla být nižší než **12l/min**. Tohoto průtoku lze dle Obr. 2.2 dosáhnout při **otáčkách čerpadla 750 ot/min**, které odpovídají napájecí frekvenci (při zanedbání skluzu) **25 Hz**.

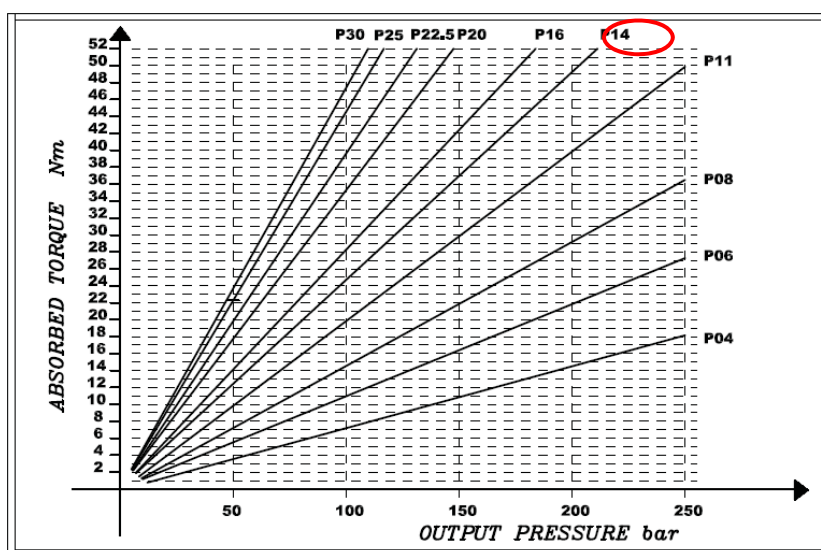
Kromě správných otáček čerpadla musí mít olej předepsanou minimální viskozitu, aby byl dostatečně vazký a čerpatelný. Teplota oleje protékaného čerpadlem (za nádobou a filtrem) by neměla překročit **40 °C**. Tuto teplotu lze hlídat pomocí ručkového manometru s teploměrem TM1.

Výstupní teplota oleje je snímána pomocí čidla Pt100. Teplotě 40 °C odpovídá odpor 116 Ω, teplotě 60 °C odpor 123 Ω, teplotě 80 °C odpor 131 Ω a teplotě 100 °C odpor 139 Ω (100 Ω odpovídá 0 °C a v daném rozsahu naroste s každým °C odpor přibližně o 0,39 – 0,38 Ω).

3.2 Provozní zkouška

Nejdůležitějším parametrem, který je nutno dodržet, je maximální vstupní tlak motoru YASA 1 Bar. Z tohoto důvodu byl motor čerpadla spouštěn z frekvenčního měniče, kterým bylo možné řídit průtok oleje a dle charakteristiky na Obr. 2.2 i jeho tlak (tlakovou ztrátu na jednotlivých komponentech). Tlak byl oproti prvotním předpokladům příliš velký, a tak byly z okruhu odstraněny rychlospojky, představující velký tlakový úbytek. Další neznámá hodnota tlakového úbytku je v jednotlivých kolenech okruhu, která však není možné odstranit. Přesto bylo dosaženo hodnoty 1 Baru na vstupu elektromotoru při napájecí frekvenci 36 Hz, která odpovídá přibližně rychlosti 1080 ot/min a tudíž průtoku necelých 15 l/min při teplotě oleje 22 °C. Hodnoty na jednotlivých čidlech tlaku jsou TM1 1,2 Bar, M1 1bar a TM2 0 Bar. To znamená, že na chladiči je téměř nulový tlakový úbytek, což je způsobeno zejména použitím oleje o menší viskozitě, než měl olej použitý pro získání dat na Obr. 2.3.

Dle změřeného tlaku vyvolaného čerpadlem a charakteristiky čerpadla na Obr. 3.6 lze moment předaný oleji pouze odhadnout na 0,4 Nm, což je o řád menší hodnota, než jmenovitý moment (při 1450 ot/min a výkonu 750 W je moment 4,94 Nm). Čerpadlo je tak silně předdimenzované a pracuje téměř ve stavu naprázdno; díky tomu tak je možné tvrdit, že předpokládaná provozní charakteristika na Obr. 2.2 bude dodržena a napájecí frekvence může být použita pro odhad průtoku oleje, protože otáčky rotoru se blíží otáčkám synchronním.



Obr. 3.6: Závislost absorbovaného momentu na výstupním tlaku čerpadla

4 Závěr

Chladicí okruh byl na základě jeho návrhu sestaven a jeho funkčnost byla otestována se zapojeným elektromotorem YASA, který zatím nebyl v provozu. Chlazení dobře těsní, avšak tlakový úbytek v okruhu je příliš velký, pravděpodobně kvůli jednotlivým kolenům v obvodu, jejichž tlaková ztráta není známa. Čerpadlo je tak nutné napájet z frekvenčního měniče a při frekvenci 36 Hz je tlak na vstupu elektromotoru 1 Bar a očekávaný průtok oleje je 15 l/min. Tlaková ztráta v obvodu by měla klesnout se zatěžováním chlazeného stroje, protože dojde k zahřátí oleje a v části chladicího kruhu bude protékat olej o menší viskozitě.

K zajištění nepřetržitého průtoku oleje bylo použito přibližně 7 litrů oleje.

Limitní hodnoty na jednotlivých čidlech jsou:

M1 (tlak oleje na vstupu do elektromotoru):	2,5 V ~ 1 Bar
T1 (teplota oleje na výstupu elektromotoru):	116 Ω ~ 40 °C
	123 Ω ~ 60 °C
	131 Ω ~ 80 °C
	139 Ω ~ 100 °C
Napájecí frekvence čerpadla:	25 Hz ~ 12 l/min
	49 Hz ~ 20 l/min

5 Přílohy

Příloha 1 – Transformátorový olej Nytro Lyra X

HIGH GRADE

Nytro Lyra X

Vysoce výkonný izolační olej

Inhibovaný, vysoce výkonný transformátorový olej Nytro Lyra X vyhovuje IEC 60296 Edice 4.0 včetně splnění specifických požadavků pro speciální aplikace. Je vyvinutý a formulovaný tak, aby vysoce odolával proti stárnutí oleje. Nytro Lyra X vyniká mimořádnou oxidační stabilitou, což umožňuje dosahovat delší životnosti transformátoru a to i s nižšími nároky na údržbu.

Navržen pro těžký provoz

Tento produkt byl speciálně vyvinutý pro použití v elektrických zařízeních plněných olejem – včetně výkonových a distribučních transformátorů, usměrňovačů, zhášeců elektrického oblouku a vypínačů.

Výkonnost a přínosy

Velmi dobrý přenos tepla. Díky nízké viskozitě a viskozitnímu indexu tento olej nabízí extrémně dobré charakteristiky přenosu tepla. Tím je zajištěn účinný odvod tepla z jádra a vinutí transformátoru.

Spolehlivá oxidační stabilita. Je vyvinutý tak, aby odolával proti stárnutí. Tento olej má dobrou oxidační stabilitu, takže umožňuje zvýšenou životnost transformátoru a to i při minimální údržbě.

Velmi dobré nízkoteplotní vlastnosti. Charakteristiky naftenického oleje umožňují start transformátoru při nejnižších možných teplotách bez použití depresantu.

Vysoká elektrická pevnost. Pokud je tento olej správně skladován a manipulován, splňuje a převyšuje nejpřísnější požadavky na elektrickou pevnost.

Popis produktu

Nytro Lyra X vyhovuje požadavkům normy IEC 60296 Edice 4 plně inhibované oleje. Nynas zařazuje tento olej do skupiny high grade (vysoce jakostní oleje).

Olej Nytro Lyra X je pečlivě analyzován a prošel následujícími testy:

- ASTM D1275 metoda B
- IEC 62535
- DIN 51353

Všechny přísady jsou deklarovány podle IEC 60296 Edice 4.0

Další informace

Jsme potěšeni že jste si vybrali náš olej. Pokud máte nějaké dotazy týkající se dalších produktů a služeb, kontaktujte prosím místního zástupce společnosti Nynas. Vedle špičkové kvality olejů nabízíme i širokou řadu služeb, včetně rychlých dodávek po celém světě, laboratorní rozborů vzorků, školení, semináře a mnoho dalšího. Stačí požádat. Více na www.nynas.com



PRODUKTOVÝ LIST
Nytro Lyra X

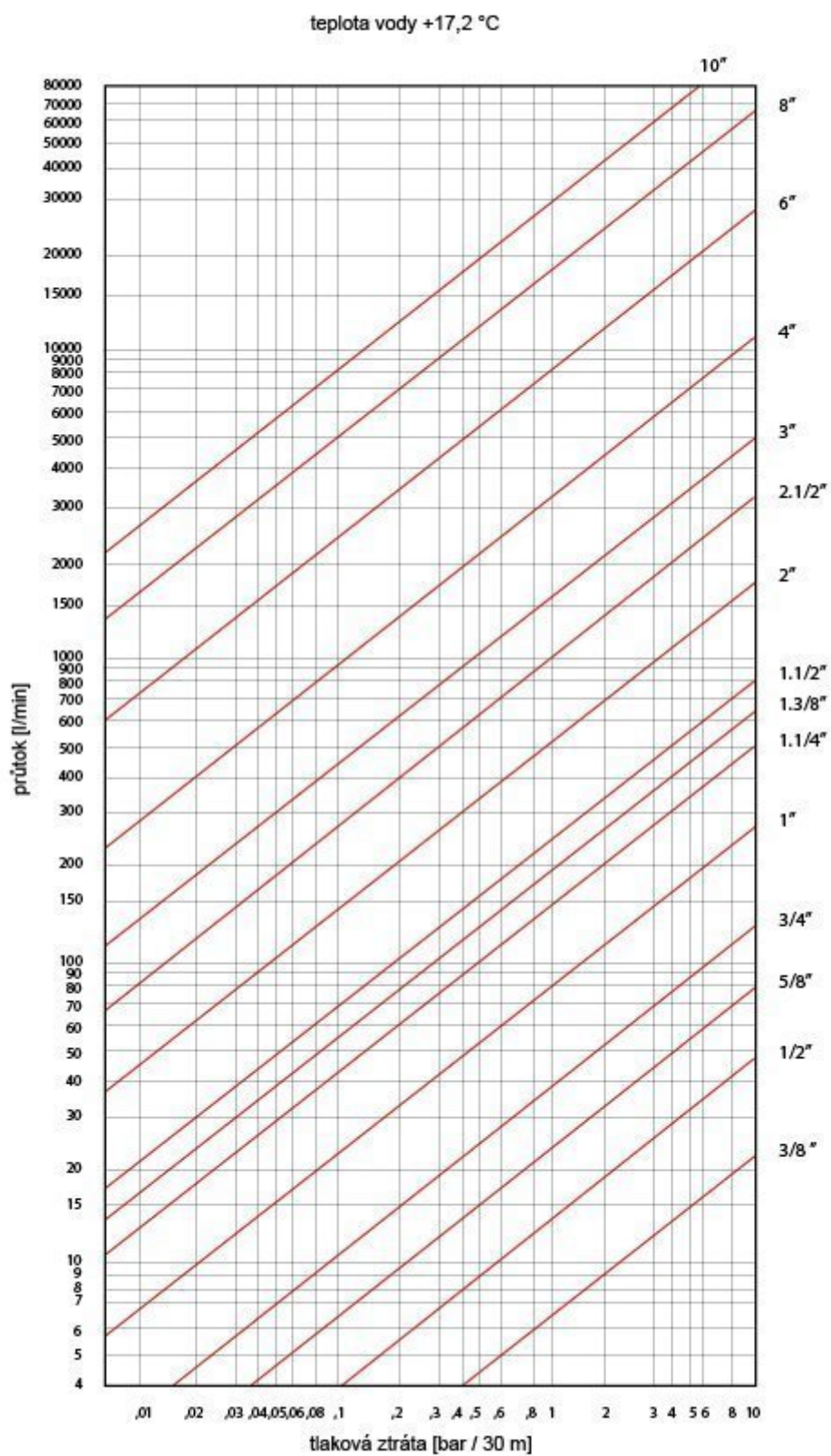
VLASTNOSTI	JEDNOTKY	METODY TESTU	LIMITY SPECIFIKACÍ		TYPICKÉ HODNOTY
			MIN	MAX	
1 - Funkční vlastnost i					
Kinem. viskozita při 40°C	mm2/s	ISO 3104		12,0	9,6
Kinem. viskozita při -30°C	mm2/s	ISO 3104		1800	926
Bod tuhnutí í	°C	ISO 3016		-40	<-48
Obsah vody	mg/ kg	IEC 60814		30	<20
Průrazné napětí í					
- před sušením	kV	IEC 60156	30		40-60
- po sušení	kV	IEC 61156	70		>70
Hustota při 20°C	kg/dm3	ISO 12185		0,895	0,870
Ztrátový činitel tg δ při 90°C		IEC 60247		0,005	0,001
2 – Raf ínce / stabilita					
Vzhled		IEC 60296	Čirý, bez úsad		vyhovuje
Kyselost	Mg KOH/g	IEC 62021		0,01	<0,01
Mezipovrchové napětí í	mN/m	ISO 6295	40		50
Celkový obsah síry	%	ISO 14596		0,15	0,01
Korozivní síra		DIN 51353	Není korozivní		Není korozivní
Potenciálně korozivní síra		IEC 62535	Není korozivní		Není korozivní
Korozivní síra		ASTM D1275B	Není korozivní		Není korozivní
Obsah DBDS	mg/kg	IEC 62697-1		neměřitelný	neměřitelný
Obsah ant oxidantu	% hm	IEC 60666	0,08	0,4	0.38
Přísady pasivátorů kovů	mg/kg	IEC 60666		neměřitelný	neměřitelný
Obsah 2-furfuralu a odpovídajících složek	mg/kg	IEC 61198		0,05	<0,05
Obsah aromátů	%	IEC 60590			5
3 - Výkonnost					
Při 120°C, 500 hod.		IEC 61125 C			
Celková kyselost	mg KOH / g			0,3	0,06
Kaly	%hm.			0,05	<0,02
Ztrátový činitel při 90°C				0,050	0,020
4 - Zdraví, bezpečnost a životní prostředí					
Bod vzplanut í PM	°C	ISO 2719	135		152
Obsah PCA	% hm	IP 346		3	<3
Obsah PCB		IEC 61619	neměřitelné		neměřitelné

Nytro Lyra X je inhibovaný izolační olej s extrémně dobrými elektroizolačními vlastnostmi a vynikající odolností proti stárnutí, který vyhovuje IEC 60296 Ed.4 (2012), speciální aplikace

Hluboce hydrogenovaný izolační olej
Datum vydání 1.4.2012



Příloha 2 – tlaková ztráta hadic na 30 m protékaných vodou



Příloha 3 – Přehled použitých komponent

Komponenta	Výrobce	Označení
Čerpadlo	Brevini	OT200 P14 D
Vzduchový chladič oleje	Heinhlich Energy	HCA-C47.40-4D-100-TSS
Olejový filtr	Sofima	CCA 152 CV1
Manometr + teploměr analogový 2x	Concept	
PT100	Siemens	
Čidlo tlaku	Siemens	QBE2003-P4

Literatura

[1] <https://www.yasa.com/yasa-p400/>

Seznam obrázků a tabulek

Tab. 1: Požadavky na chlazení udávané výrobcem	5
Obr. 2.1: Seznam povolených olejů udávaný výrobcem	6
Obr. 2.2: Provozní charakteristika čerpadla	6
Obr. 2.3: Tlaková ztráta chladiče v závislosti na průtoku oleje	7
Obr. 3.1: Schéma chladicího okruhu	8
Obr. 3.2: Foto chladicího okruhu, 1. část	9
Obr. 3.3: Foto chladicího okruhu, 2. část	9
Obr. 3.4: Manometr s teploměrem	10
Obr. 3.5: Zapojení tlakového čidla QBE2003-P	10
Obr. 3.6: Závislost absorbovaného momentu na výstupním tlaku čerpadla	11

Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum	Jméno
0	Všechny	Publikování dokumentu	13.5.2020	Laksar