



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

DIAGNOSTIKA STROJE ZALOŽENA NA MODELECH

MACHINE DIAGNOSTICS BASED ON MODELS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Juraj Kapusta

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	Bc. Juraj Kapusta
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Vedoucí práce:	Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

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:

Diagnostika stroje založena na modelech

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je vytvořit systém pro diagnostiku stroje založeného na modelu / modelech. V rámci práce bude předložen stroj, pro který bude vytvořen simulační model. Následně systém bude porovnávat data získaná z tohoto modelu a daty z měření a bude provádět diagnostiku tohoto stroje.

Cíle diplomové práce:

Literární rešerše na téma diagnostika založená na modelech.

Systémový rozbor.

Tvorba modelu.

Ověření vytvořeného modelu na reálném servopohonu.

Zhodnocení možností využití pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

HRABOVCOVÁ, Valéria, Pavol RAFAJDUS, Marek FRANKO a Peter HUDÁK. Meranie a modelovanie elektrických strojov. 3. vydání. Žilina: EDIS, 2014, ISBN 978-80-554-0852-1.

GREPL, Robert. Modelování mechatronických systémů v Matlab SimMechanics. Praha: BEN - technická literatura, 2007, 151 s. : il. ; 23 cm. ISBN 978-80-7300-226-8. (CS)

KARBAN, Pavel. Výpočty a simulace v programech Matlab a Simulink. Brno: Computer Press, 2006, 220 s. : il., tabulky, grafy ; 23 cm. ISBN 80-251-1301-9. (CS)

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Hlavní myšlenka je zaměřena na diagnostiku konkrétního hydraulického systému, tj. snímání fyzikálních veličin hydraulického okruhu s nádrží a odstředivým čerpadlem poháněného asynchronním motorem. Jedná se o soustavu potrubí napojených na čerpadlo, kde vlivem jeho práce vytváří průtok vody a nárůst tlaku.

V praxi je tato problematika řešena také v energetickém a atomovém průmyslu. Primární okruhy v některých případech nelze navrhnout nebo upravit tak, aby se dala hodnota tlaku snímat lokálně. Proto je zapotřebí měřit tuto veličinu nepřímou – a to z proudů motoru. Hlavní myšlenkou práce je diagnostikovat systém nepřímou metodou – konkrétně detekovat stav hydraulického okruhu (tlak, průtok) z hodnot, které jsme schopni měřit a odhalit poškození v předstihu.

V druhé polovině závěrečné práce je aplikace částí konkrétního hydraulického systému do simulačního prostředí MATLAB Simulink. Model hydraulického obvodu obsahuje matematicko-fyzikální vztahy, které simulují průběh zmíněného experimentu. Výsledky simulace jsou porovnávány s výsledky experimentu. Model také vyšetřuje simulaci poruchového stavu, kdy přivádíme do hydraulického obvodu tlakové pulzace. Právě tyto změny v hydraulické části se projevují na charakteristikách čerpadla a asynchronního motoru, tím pádem jsme schopni diagnostikovat tento systém.

KLÍČOVÁ SLOVA

diagnostika stroje, hydraulický obvod, tlakové pulzace, Matlab Simulink model, tvorba diagnostického modelu

ABSTRACT

The main idea is focused on the diagnostics of a specific hydraulic system, i.e. sensing the physical quantities of the hydraulic circuit with a tank and a centrifugal pump driven by an asynchronous motor. It is a system of pipes connected to the pump, where due to its work it creates a water flow and a pressure increase.

In practice, this issue is also addressed in the energy and nuclear industries. Primary circuits in some cases cannot be designed or modified to be able measure locally the pressure value. It is necessary to measure this quantity indirectly - from the motor currents. The main idea of the work is to diagnose the system by an indirect method - specifically to detect the state of the hydraulic circuit (pressure, flow) from the values that we are able to measure and detect damage in advance.

In the second part of the thesis is the application of the parts of a specific hydraulic system in the simulation environment MATLAB Simulink. The model of the hydraulic circuit contains mathematical-physical relations that simulate the course of the mentioned experiment. The results of the simulation are compared with the results of the experiment. The model also investigates the simulation of a fault condition, when we supply pressure pulsations to the hydraulic circuit. It is these changes in the hydraulic part that affect the characteristics of the pump and the asynchronous motor, so we are able to diagnose this system.

KEYWORDS

Machine Diagnostics, Hydraulic circuit, Pressure Pulsations, Matlab Simulink Model, Creation of Diagnostic Model

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KAPUSTA, Juraj. *Diagnostika stroje založena na modelech*, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2021, 109 s., Vedoucí diplomové práce Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Poděkování patří především vedoucímu Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D nejen za vypsání tohoto zajímavého tématu, ale také za trpělivost, se kterou řešil mnoho problémů a podílel se na tvorbě této závěrečné práce.

Dále chci poděkovat své rodině, která mě během celého studia podporovala v různých směrech, no nejvíce mě naplňovala odhodláním, že studium na univerzitě stojí za všechnen čas a námahu, i když to tak nevypadalo. Významné dekuju patří mojim rodičom a sestře, který to se mnú vydržali.

V další řadě chci poděkovat svým spolužákům, na které budu mít hezké vzpomínky a za vzájemnou pomoc při překonávání strastí během dvouletého studia (hlavne Ondrisovi faded). Poděkování patří také pedagogům, kteří se na výuce podílely a odevzdaly nám cenné vědomosti, vlastní zkušenosti a rady, jak být v budoucnosti správným inženýrem.

No a nesmím zapomenút všetkých, kterých sem na tejto ceste stretel:

- *Ze Záhoráckej nonšalantnej* dekuju Zuzke, Novesovi, Samečkovi, Papysovi, Majovi, Maťošovi, Lašimu (starec), Bórkovi, Jantrcovi a Romči, MaťoBryndzovi, Ad'uške a Adamovi, Adamosovi, Timči, Macejovi, Jurajovi J.s Jasmin, Kiksterovi s Verčou,
- *Z party Brňenskej* dekuju Radkovi a rodině, Rasťovi s Lucinkou, Markovi a Zlatuši, JožkoviMašekovi, Lukimu, Ondrisovi a Simči
- *9.NP Purkyňovi koleje* – budúcemu Ing.Simon Zelenay, Mirkovi a Petérovi, Hermésovi, Rumbovi a Mílovi, Megié, Máňi a Saši + Ejdm, Andrej, Maroš, BorisBarber a jeho boys, celý spolok Drumondays

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 21.5.2021

.....
Juraj Kapusta, Bc.

OBSAH

ABSTRAKT	5
KLÍČOVÁ SLOVA	5
ABSTRACT	6
KEYWORDS	6
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE	7
PODĚKOVÁNÍ	9
ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ	9
OBSAH 11	
1 MOTIVACE	13
2 ÚVOD	15
3 DIAGNOSTIKA STROJNÍCH ZAŘÍZENÍ – ZÁKLADNÍ POJMI A JEJICH DEIFNICE	17
3.1 Úkoly technické diagnostiky, diagnostický objekt	17
3.2 Diagnostický prostředek a systém.....	18
3.3 Diagnostický model – rozdělení a vlastnosti	18
4 DIAGNOSTIKA STROJE ZALOŽENA NA MODELECH	21
4.1 Základní myšlenka	21
4.1.1 Nominální a poruchové chování	21
4.1.2 Charakterizace poruchy	23
4.2 Metody diagnostiky založené na modelech	25
4.2.1 Logické základy diagnózy	25
4.3 Diagnostika systémů s diskrétními událostmi	26
4.3.1 Modelování systémů s diskrétními událostmi.....	26
4.3.2 Praktické úvahy u diagnostiky systémů s diskrétními událostmi	28
4.4 Diagnostika spojitých systémů.....	29
4.4.1 Modelování diagnostických spojitých systémů	29
4.4.2 Praktické úvahy u diagnostiky spojitých systémů	30
4.5 Diagnostika hybridních systémů	33
4.5.1 Modelování diagnostických hybridních systémů.....	33
4.5.2 Praktické úvahy u diagnostiky hybridních systémů.....	34
4.6 Distribuovaná diagnóza.....	35
5 SYSTEMATICKÝ ROZBOR – POPIS DIAGNOSTIKOVANÉHO SYSTÉMU	36
5.1 Prvotní určení systému.....	36
5.2 Určení systémových prvků na elementární úrovni.....	38
6 SYSTEMATICKÝ ROZBOR – TVORBA DIAGNOSTICKÉHO MODELU	53
6.1 Tvorba matematicko-fyzikálního modelu – Simulační prostředí.....	53
6.2 Tvorba matematicko-fyzikálního modelu – Implementace diagnostických prvků do modelů	53

6.3	Tvorba matematicko-fyzikálního modelu – Tvorba subsystémů.....	69
6.4	Tvorba matematicko-fyzikálního modelu – Zapojení celého systému	73
7	POPSÁNÍ SHODY SYSTÉMU S DIAGNOSTICKÝM MODELEM.....	74
7.1	Prováděný experiment – Statická část.....	74
7.2	Srovnání průběhů experimentu a simulace statické části.....	77
7.3	Použitá diagnostická metoda.....	79
7.4	Prováděný experiment – Dynamická část	81
7.5	Srovnání průběhů experimentu a simulace dynamické části	82
7.6	Zhodnocení dosažených výsledků obou částí	92
8	ZHODNOCENÍ A DISKUZE.....	94
9	ZÁVĚR	95
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	97
11	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK	101
11.1	Seznam tabulek	101
11.2	Seznam obrázků	101
11.3	Seznam použitých zkratk.....	105
11.4	Seznam použitých veličin	106
12	SEZNAM PŘÍLOH	109

1 MOTIVACE

V úvodu jsme si stanovili úkoly diagnostiky a cíle, kterých má být dosaženo. Diagnostika se vyskytuje v různých odvětvích průmyslu, jako například průmysl energetický a jaderný. V případě výroby energie při štěpení jadrového paliva se jedná o výkon 10 až 100 MW. Uvolněné teplo se odebírá primárním okruhem, kde se vyskytují chladicí potrubní systémy. Jejich úkolem je pomocí oběžného média odebírat nahromaděné teplo, které při procesu vznikne. Výměna tepla probíhá skrze tepelné výměníky, které jsou v přímém styku s médiem. Ze systému je teplo vedeno skrze výměník na chladicí médium (nejčastěji voda), které obíhá potrubím. To se na jiném místě schladí a opět putuje k tepelnému výměníku.

Jelikož se jedná o potrubní systém sloužící k dopravě reálné tekutiny, doprovází tento proces několik jevů způsobující nelinearitu. V první řadě se jedná o turbulentní proudění, které vzniká při vyšších rychlostech proudění z ustáleného laminárního proudění. Další nepříznivé jevy vznikají při otevírání nebo zavírání ventilů a klapek, kdy se projevují náhlé změny v průtoku a tlaku. Při vysokých rychlostech proudění může docházet ke kavitaci nebo jiným tlakovým pulzacím souvisejícím s chodem čerpadla.

Problém vzniká tehdy, když potřebujeme zjistit absolutní tlak v některém místě hydraulického obvodu. Z důvodu nemožnosti narušení konstrukce potrubí primárního okruhu nelze snímat tlak, proto je nutno použít nepřímou metodu. Tou je zaměření se na veličiny čerpadla a elektromotoru, a to konkrétně fázových proudů elektromotoru, výkon čerpadla a moment na výstupní hřídeli elektromotoru. Tento způsob není složitý a plně poslouží k potřebné hloubce diagnostiky s potřebnou přesností.

2 ÚVOD

Stroje používané v provozu všeobecně pracují tak, jak jsou od výroby navrženy s určitou funkcionalitou a designem. Uvažuje se namáhání součástí, opotřebení při samotném chodu stroje nebo opotřebení externími vlivy. Tyto stroje existují v reálném prostředí, kde se musí uvažovat s jejich postupnou degradací. Tuto vlastnost musíme sledovat proto, abychom dokázali predikovat její chování a tím zachovat stroje v co nejlepší kondici, tj. zachovat takový soubor vlastností, které jim byli vloženy při výrobě, montáži a uvedení do provozu.

Diagnostikování stroje je tedy v první řadě činnost, která sleduje a vyhodnocuje veličiny diagnostického systému. Pod ním si můžeme představit jakýkoli systém různé komplexnosti, pozorovat ho a na základě získaných dat z měření vyhodnotit aktuální stav tohoto systému. Proto musíme znát, jak se chová tento systém – určit jeho prvky a provázanost mezi nimi na potřebné úrovni. Dále musí mít tyto prvky jasně definované parametry, jak se systémem interagují – přeměňují vstupy na výstupy.

Právě takovéto pohlížení na stroj jako systém (celek tvořen z prvků a návazností mezi nimi) nám dovoluje představit si jakýkoli stroj nebo soustavu strojů jako diagnostický systém. V dnešní době se diagnostika hodně užívá ve většině či už domácích spotřebičů, automobilových a jiných dopravních prostředcích, výrobních systémech a neposlední řadě v provozu obrovských továren s nepřetržitým provozem, jako je třeba energetický průmysl. Právě s rostoucí komplexností systému narůstá důležitost tento systém sledovat podrobně. Tento proces bývá neustálý a dohlíží nad systémem. Děje se to z několika důvodů:

- Prediktivní údržba upozorňuje uživatele stroje na stav systému, kdy hrozí bezprostřední porucha na nějaké části podle aktuálního stavu měřené veličiny
- Monitoruje veličiny systému a zaznamenává je do trendových funkcí, podle kterých dokáže odhadnout čas do poruchy
- Podle typu a velikosti odchýlení od provozních hodnot dokáže detekovat druh poruchy

To přináší velmi příznivé vlastnosti po stránce spolehlivosti stroje. Úkolem je zabezpečit, aby stroj, který ve fázi testování a uvedení do provozu, vykazoval uspokojivé výsledky si tento stav systému udržel po celou dobu návrhu provozu stroje. To se děje sledováním kondice jednotlivých částí systému. Pod tím si představíme parametry částí samotného stroje a soubor parametrů, se kterými přichází do styku při procesech, ať už nutných pro provoz nebo nastavitelných pro požadované operace.

Další výhodou je zabránění tomu, aby se proces dokončil s již vzniklou poruchou. Ve většině případů dochází ke kolizi částí stroje v daném procesu. Pokud se jedná o výrobní stroj, dochází ke škodě na majetku nejen na stroji samotném, ale také poškození jiných do procesů vstupujících materiálových a informačních toků. Kromě poškození na majetku je také nutné, aby se dbalo na bezpečnost uživatele při práci na tomto stroji, což může mít někdy trvalé následky na zdraví nebo dokonce skončit ztrátou na životech.

3 DIAGNOSTIKA STROJNÍCH ZAŘÍZENÍ – ZÁKLADNÍ POJMI A JEJICH DEIFNICE

3.1 Úkoly technické diagnostiky, diagnostický objekt

Diagnostikovatelnost (diagnostikování) poruchového stavu je operace prováděná za účelem sledování a zjištění poruchového stavu, lokalizace porouchané části a identifikace vady nebo poruchy. V technice se tento samostatný vědní obor nazývá *technická diagnostika* – obor zabývající se většinou bezdemontážními, nedestruktivními metodami a prostředky stanovení technického stavu objektu. Okamžité vyhodnocení technického stavu nazýváme *diagnóza*. Jedná se o vyhodnocení provozuschopnosti objektu za daných technických podmínek [1].

Základními úkoly technické diagnostiky jsou:

- *detekce* vady nebo poruchy – tj. identifikace vady nebo poruchy
- *lokalizace* vady nebo poruchy – tj. určení místa vady nebo poruchy v objektu.

Jev spočívající v ukončení schopnosti objektu plnit požadovanou funkci nazýváme *porucha* (*failure*). Pokud stroj neplní požadavky uživatelem specifikované, nazýváme tento jev *vada* (*defect*). Vada nemusí nutně znamenat ukončení schopnosti plnit požadovanou funkci [1].

Diagnostický objekt je libovolně veliký celek v rámci konstrukce systému, který je podroben diagnostice. Ve vztahu k diagnostikovanému objektu určujeme *technický stav objektu* – soubor hodnot charakterizující podstatné vlastnosti funkčních částí diagnostikovaného objektu v určitém časovém okamžiku. Testovaná funkční jednotka je nejmenší (podsystem, funkční jednotka, součástka), kterou je ještě možné vhodnou demontáží a montáží vyměnit [1].

Funkčnost objektu je schopnost objektu vykonávat určitou funkci dle technických podmínek. Objekt může být funkční, ale nemusí být provozuschopný. *Provozušopný objekt* je tehdy, pokud je objekt schopen vykonávat všechny funkce, pro které byl určen. [1].

Prognóza je extrapolace vývoje technického stavu do budoucnosti. Cílem prognózy je stanovit na základě statistických vyhodnocení pravděpodobnost bezporuchového stavu v následujícím období nebo na základě postupných poruch stanovení termínů dílčích a generálních oprav nebo výměny určitého bloku objektu. V technické diagnostice se používá také pojem *geneze* – analýza příčin poruchy nebo předčasného zhoršení technického stavu objektu [1].

Diagnostická veličina je veličina, která je nositelem informace o technickém stavu objektu, (př. teplota, rozměr, elektrický odpor). Tito veličiny jsou vstupní parametr pro *testování*, tj. ověřování provozuschopnosti zařízení podezřelého z chybné funkce, popřípadě prokazování, zda určitá hypotéza o původu poruchy či vady je správná, či nikoliv [1].

3.2 Diagnostický prostředek a systém

Pod pojmem *diagnostický prostředek* rozumíme soubor technických a pracovních postupů pro analýzu a vyhodnocení stavu diagnostikovaného objektu. Pracovními postupy jsou diagnostické algoritmy (tj. sled elementárních úkonů diagnostikování) včetně programového vybavení pro generování a vyhodnocení testů, dále metody výběru diagnostických veličin, sestavení matematických modelů apod. Diagnostické prostředky mohou být realizovány jako tzv. vnitřní (jsou součástí objektu) nebo jako tzv. vnější (jsou samostatné) [2].

Diagnostický systém je systém, který je tvořen diagnostickými prostředky, diagnostikovaným objektem a obsluhou. Základní rozdělení diagnostických systémů je na *systémy on-line* a *systémy off-line*. Monitorovací *systémy off-line* jsou pro náš postup nepodstatné, proto je nebudeme dále rozvíjet [2].

Diagnostické systémy on-line diagnostikují (tj. vyhodnocují) technický stav objektu při provozu. Zvláštní skupinu tvoří tzv. *monitorovací systém*, což je on-line systém trvale připojený k diagnostikovanému objektu [2].

Monitorování je tedy trvalé sledování stavu objektu s průběžným vyhodnocováním mezních stavů objektu nebo vyhodnocováním trendů postupných poruch. Speciálním případem systému on-line jsou automatické diagnostické systémy, které jsou podporované počítačem [2].

3.3 Diagnostický model – rozdělení a vlastnosti

Modelování je účelové zjednodušení zobrazení originálu jiným systémem tzv. *modelem*. *Diagnostický model* je zobrazení bezporuchových a poruchových stavů prvku objektu (včetně vztahů mezi těmito prvky a okolím) nebo zobrazení bezporuchového a poruchového chování objektu. Pojem chování systému můžeme chápat jako časově proměnnou reakci systému na vstupní podněty z okolí a je projevem určitých funkcí systému [3].

Složité originály se snáze modelují hierarchicky, tj. nejprve se vytvářejí submodely odpovídající subsystémům daného objektu-systému. Toto tzv. víceúrovňové modelování se používá v diagnostice nejen k členění složitých objektů, ale také k rozdělení na diagnostický model bezporuchového objektu a na model poruchy prvku struktury tohoto objektu. U diagnostických modelů většinou provádíme analýzu nebo simulaci jednoduché poruchy neboli předpokládáme vždy pouze jediný porušený prvek z množiny prvků tvořící objekt [3].

Diagnostické modely dělíme na:

- *Fyzikální* – jedná se o hmotný a reálný objekt, který je zhotoven na stejném fyzikálním principu jako diagnostikovaný objekt (např. zmenšené strojní zařízení apod.) nebo je na analogickém fyzikálním principu (např. elektrický model tepelného nebo hydraulického objektu)
- *Abstraktní* – je to model spíše nazývaný matematický. *Matematický diagnostický model* je realizován soustavou hypotéz o vztazích mezi diagnostickými veličinami. Tyto vztahy popisují relační strukturu nebo chování objektu (tj. systému nebo subsystému nad diagnostikovaným objektem) v bezporuchovém stavu a v poruchových stavech [3].
- *Matematické modely* lze rozdělit na modely *analytické, logické a topologické*.

Součástí *matematických modelů* jsou modely *simulační*. S rozvojem metod modelování byly vyvinuty simulační modelovací jazyky, které poskytují prostředky, usnadňující efektivní popis relační struktury systému nebo chování a propojení jednotlivých funkčních bloků [3].

Programové vybavení v součinnosti se simulačním jazykem umožňuje na základě naměřených dat řešit konkrétní třídu modelů, programovým experimentováním provádět analýzu chování modelovaného systému v závislosti na zvolených parametrech, a tak interaktivně identifikovat správné hodnoty parametrů. Pro diagnostiku lze simulačním modelem vytvářet databanku chování systému pro různé stavy prvků, tj. pro různé hodnoty numericky vyjádřitelných ale neměřitelných strukturálních a funkčních parametrů [3].

Analytický model popisuje systém soustavou algebraických (statický model) nebo diferenciálních a diferenčních rovnic (dynamický model). Analytické modely se dále dělí na modely fyzikálně matematické a modely empirické [3].

Fyzikálně matematický model předpokládá perfektní znalost fyzikálních a chemických zákonitostí a všech fyzikálních a chemických konstant charakterizujících daný objekt a dané chování – nepoužívá se pro neznalost některých zákonitostí nebo konstant nebo pro jeho složitost [3].

Empirický model je odvozen na základě experimentálně naměřených dat na vstupech a výstupech reálného objektu. Sem spadají tzv. parametrické modely – u tohoto modelu se konstanty (koeficienty, parametry) předem odhadnutých rovnic získají např. statistickým vyhodnocením naměřených dat. Funkční závislost mezi parametry rovnic a parametry objektu se zjišťují statistickými metodami, např. korelační analýzou nebo prostřednictvím simulačního modelu [3].

Logický model je zobrazením systému prostřednictvím aparátu matematické statistiky. Cílem logického modelu je simulace chování objektu na základě logického chování jeho subsystémů. Výhodou logického modelu je možnost definování vztahů mezi veličinami na zvolené rozlišovací úrovni bez ohledu na fyzikální podstatu veličin. V modelu se nevyskytují fyzikální proměnné, ale vstupní, výstupní a vnitřní stavové veličiny, které nabývají pouze binárních hodnot. Při konstrukci modelu se využívá logických funkcí a Booleovské algebry.

Pro sestavení modelu se u každého funkčního bloku popisuje obvykle jeho provozuschopnost nebo neprovozuschopnost. U modelů spojitých a diskrétních systémů je obvyklé definovat provozuschopnost jako logická 1, neprovozuschopnost jako logická 0. [3].

Aplikace matematické logiky je vhodná pro objekty s vyznačenou funkční a blokovou strukturou. Každý blok musí mít definované vstupy a výstupy. Pro modelování vztahů mezi strukturálními parametry je logické modelování nevhodné.

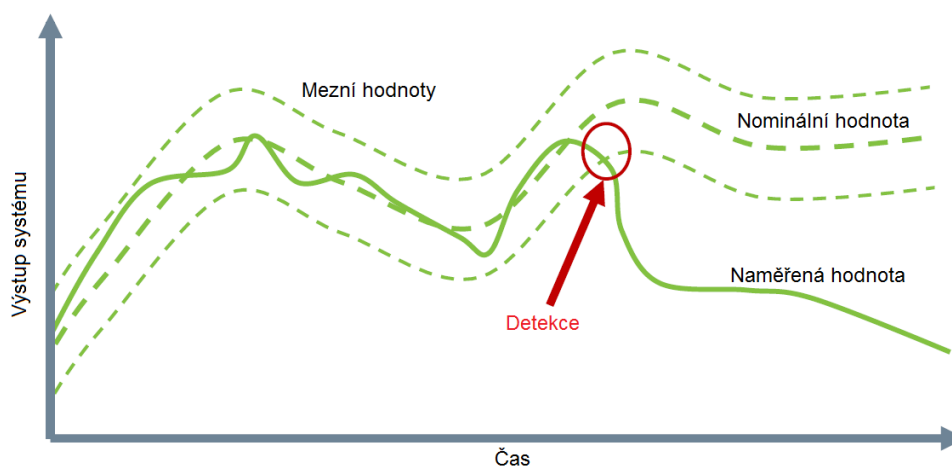
Topologický model ve formě orientovaného grafu je vhodné použít pro popis vlastností a chování jednotlivých prvků. V tomto grafu vrcholy tvoří stavy, příčiny a důsledky poruch a vad, vlastnosti a parametry prvků apod., hrany tvoří relace nebo kauzální vztahy [3].

4 DIAGNOSTIKA STROJE ZALOŽENA NA MODELECH

4.1 Základní myšlenka

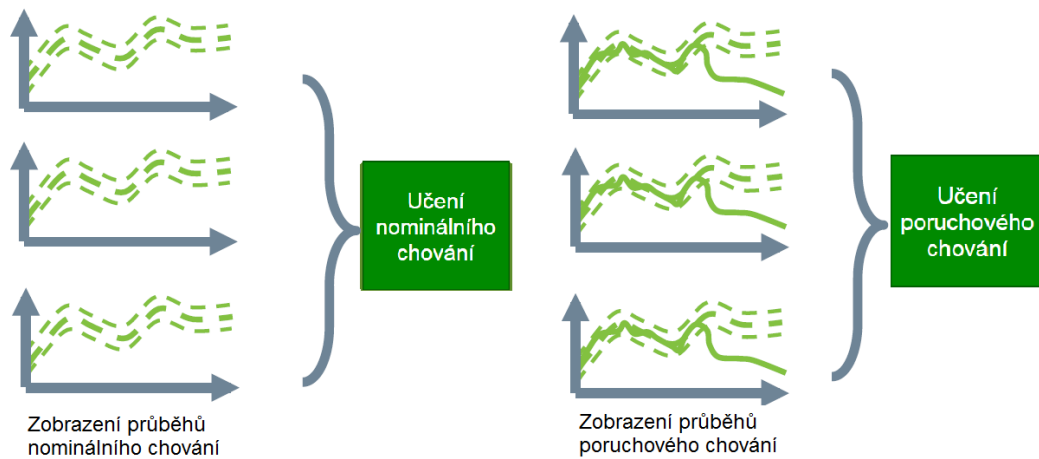
4.1.1 Nominální a poruchové chování

Nominální chování vychází ze znalosti o systému a referencí chování k jiným podobným systémům. Pochází z odborných znalostí, známých provozních limitů, fyzikálního modelu, přístupů strojového učení atd. V diagnostice je tohle chování založené na modelu pocházejícího z reference modelu, která výslovně popisuje nominální chování. Modely mohou být statické nebo dynamické, proto jsou vhodné k simulacím provozu stroje [4].



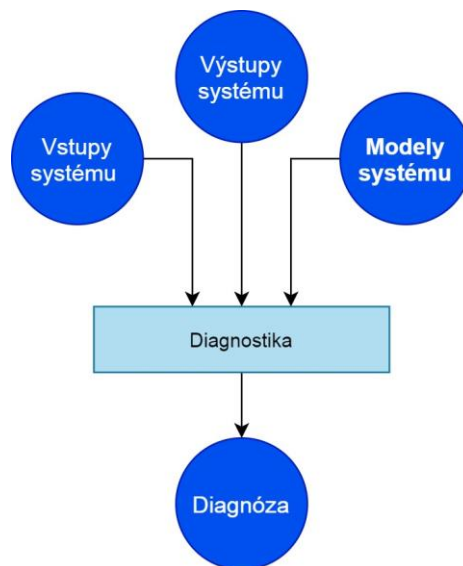
Obrázek 4-1 Zobrazení nominálního a poruchového chování
[Zdroj:4 – str.7]

Hlavním úkolem diagnostiky je tedy vytvoření takového modelu, který dokáže poruchu spolehlivě odhalit. K tomu se využívá přístup strojového učení, díky kterému si je model schopen zapamatovat nominální a poruchové chování. Tohoto jevu lze docílit pomocí dvou schopností – tj. *detekce* – rozdělení na chování nominální a nenominální, tedy poruchové a *izolace* – rozdělení chování do různých tříd poruchového chování [4].



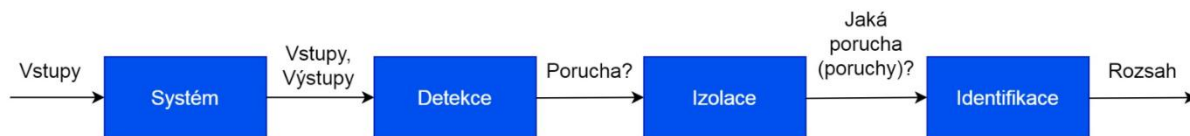
Obrázek 4-2 Učení nominálního a poruchového chování
[Zdroj: 4, str.7]

Při těchto metodách vzniká hned několik problémů – nedostatek dat z průběhů poruchových chování, slabá úroveň vysvětlení poruchových průběhů, vysoká rozměrnost dat a slabá identifikace. Proto je důležité používat software a modely takové, které jsou aktualizované a kompatibilní s co nejvíce uživateli. Modely mají objasňující charakter, tedy kauzální (případové) chápání a čerpají z explicitního vyjádření poruch. Je tedy potřeba vyvinout obecný model skládající se z algoritmů. Ty jsou schopny generovat modely jako vstupy, a tedy nevytváří nový systém, ale pouze provádí modelové změny [4].



Obrázek 4-3 Tvorba diagnózy
[Zdroj:5, str.6]

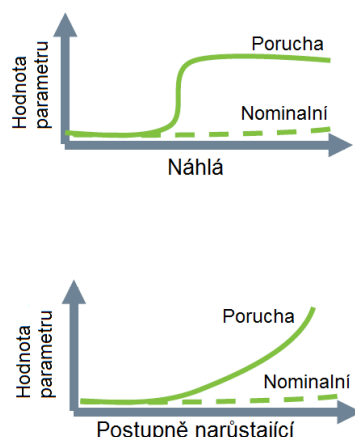
Základními úkoly jsou tedy *detekce poruchy* – zjištění, zda systém je nebo není nominálně v provozu a *izolace poruchy* – určení hlavní příčiny neočekávaného chování systému. K tomu připojíme pojem *identifikace poruchy* – určení třídy velikosti poruchy [4].



Obrázek 4-4 Algoritmus diagnostikování poruchy [Zdroj:4]

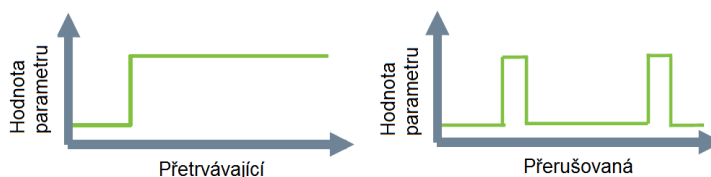
4.1.2 Charakterizace poruchy

Porucha může mít dva typy průběhu – buďto *náhlá* – změna hodnoty parametru je rychlejší než vzorkovací frekvence, nebo *postupně rostoucí* – změna hodnoty parametru je pomalejší než vzorkovací frekvence a může mít *lineární, exponenciální* nebo *libovolný průběh*. Prognostika narůstající poruchy se většinou týče počátečních postupně se rozvíjejících poruch. Naproti tomu chyby prudké lze detekovat snadněji a rychleji [6].



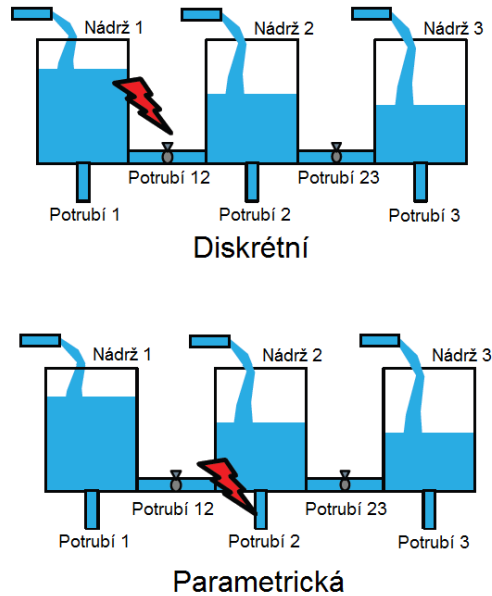
Obrázek 4-5 Porovnání průběhu náhlé a postupně narůstající poruchy [Zdroj: 4]

Porucha může mít také charakter *trvalý (přetrvávající)* – jakmile se projeví, chyba přetrvává, nebo charakter *přerušovaný* – porucha se objeví a po určitém čase zmizí.



Obrázek 4-6 Porovnání průběhu přetrvávající a přerušované poruchy [Zdroj: 4]

Dále rozdělujeme poruchy na diskrétní a parametrické. *Diskrétní* poruchy zahrnují nežádoucí změnu systému nebo modelu konstrukce, např. ventil na *Potrubí12* uvízl zavřený. *Parametrické* poruchy zahrnují nežádoucí změny systému nebo parametrů modelu, např. *Potrubí2* je ucpané [6].



Obrázek 4-7 Zobrazení příkladu diskrétní a parametrické poruchy [Zdroj: 6]

Model systému s diskrétními událostmi popisuje chování systému jako soubor diskrétních stavů a dynamiku reprezentovanou prostřednictvím událostí, které definují přechody stavu. Jako ukázkové modely je možno použít např. stroje s konečným stavem nebo Petriho sítě a jiné.

Model spojitého systému má za úkol zachytit nepřetržitý časový vývoj chování systému. Pomocí počítačů jsou tyto systémy modelovány a simulovány pomocí diferenčního počtu nebo rozdílu rovnic v diskrétním čase. Jako ukázkové modely můžeme použít modely obyčejné diferenciální rovnice, částečné diferenciální rovnice, vazbové grafy, Bayesovy sítě atd.

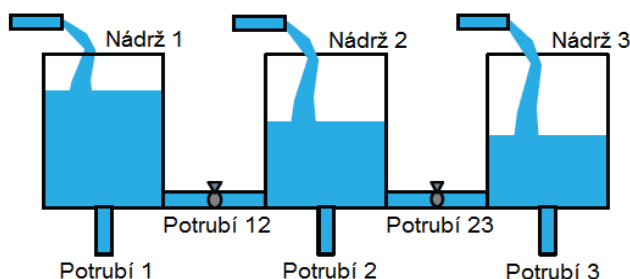
Model hybridního systému kombinuje jak kontinuální čas, tak diskrétní dynamiku. Má diskrétní stavy s kontinuálním chováním definovaným pro každý diskrétní stav. Jako ukázkové modely lze použít hybridní automaty, hybridní vazbové grafy atd [6].

4.2 Metody diagnostiky založené na modelech

4.2.1 Logické základy diagnózy

Specifikace chování slouží k popisu parametrů jednotlivých prvků a relací mezi nimi. Jedná se o logické formulace vět prvního řádu, které jsou zapsány jako vektor s proměnnými [7]:

- *SD* = popis systému, sada vět prvního řádu (*System Description*)
- *COMPS* = komponenty, sada konstant (*Components*)

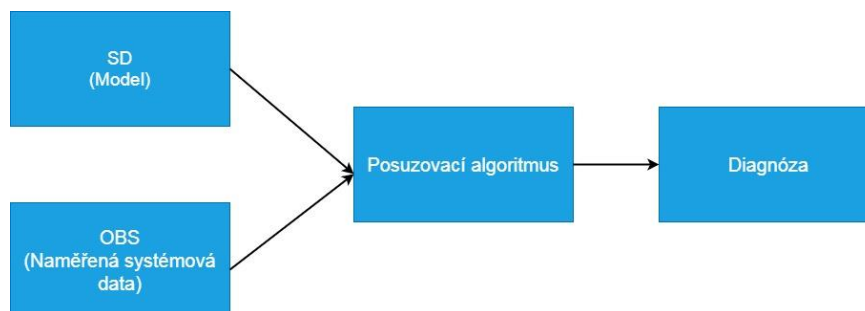


Obrázek 4-8 Příklad systému pro logický popis
[Zdroj: 4]

Diagnostika vyžaduje důkladné pozorování systému. Bez něj neexistuje způsob, jak zjistit, zda něco není v pořádku. Pro toto určení se zavádí proměnná [7]

- *OBS* = pozorování, sada vět prvního řádu (*Observations*)

SD popisuje nominální chování systému, proto je potřeba parametru, který bude detekovat poruchy. Proto je *SD* rozšířeno o *AB Predikáty (Přisuzovatel abnormality)* – stanovení parametru *AB(C)* znamená, že složka *C* je abnormální, tj. není nominální [7].



Obrázek 4-9 Popis stanovení diagnózy
[Zdroj: 7]

Přístupy založené na modelech se budou lišit v tom, jak zachycují, modelují a jak charakterizují symboly do systémových dat, se kterými vždy umí pracovat. Posuzovací algoritmus je na své nezákladnější úrovni vždy stejný. Takový přístup nefunguje dobře pro dynamické systémy a skrývá mnoho otázek, například zda uvažujeme šum snímače, jak bude v tomto rámci reprezentováno dynamické chování a jaká bude jeho výpočetní složitost. Algoritmický přístup je však spolehlivý a tvoří základ většiny algoritmů pro diagnostiku založenou na modelech z několika důvodů – popisuje nominální a chybné chování. Musíme však určit důvod nesrovnalostí mezi nominálním a pozorovaným chováním a také určit poruchy, které jsou v souladu s pozorováním [7].

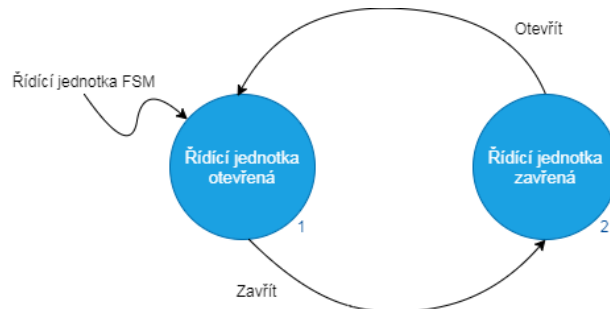
4.3 Diagnostika systémů s diskrétními událostmi

4.3.1 Modelování systémů s diskrétními událostmi

U diagnostiky systémů s diskrétními poruchami uvažujeme náhlou změnu stavů, která je výsledkem kombinací proměnných Poruchy jsou modelovány jako *nepozorovatelné* události a konečný stav stroje můžeme zapsat funkcí [8]

FSM – Stroj s konečným stavem (*Finite State Machine*), $FSM = f(X, S_e, d, x_0)$

- X je sada stavů
- S_e je soubor událostí
- d je přechodová funkce
- x_0 je počáteční stav



Obrázek 4-10 Schéma diagnostického systému s diskrétními událostmi
[Zdroj: 8]

Některé události jsou pozorovatelné a jiné nikoli, proto musíme důkladně odhadnout, jaký je možný stav, jak byl určen, zda mohlo nebo nemohlo dojít k nepozorovatelné poruchové událostmi v příkladu ventilu [8].

Máme senzor, který hlásí polohu ventilu v pravidelném intervalu, 0 pro otevřené a 1 pro uzavřené [8].

-Řekněme, že sledujeme sled událostí:

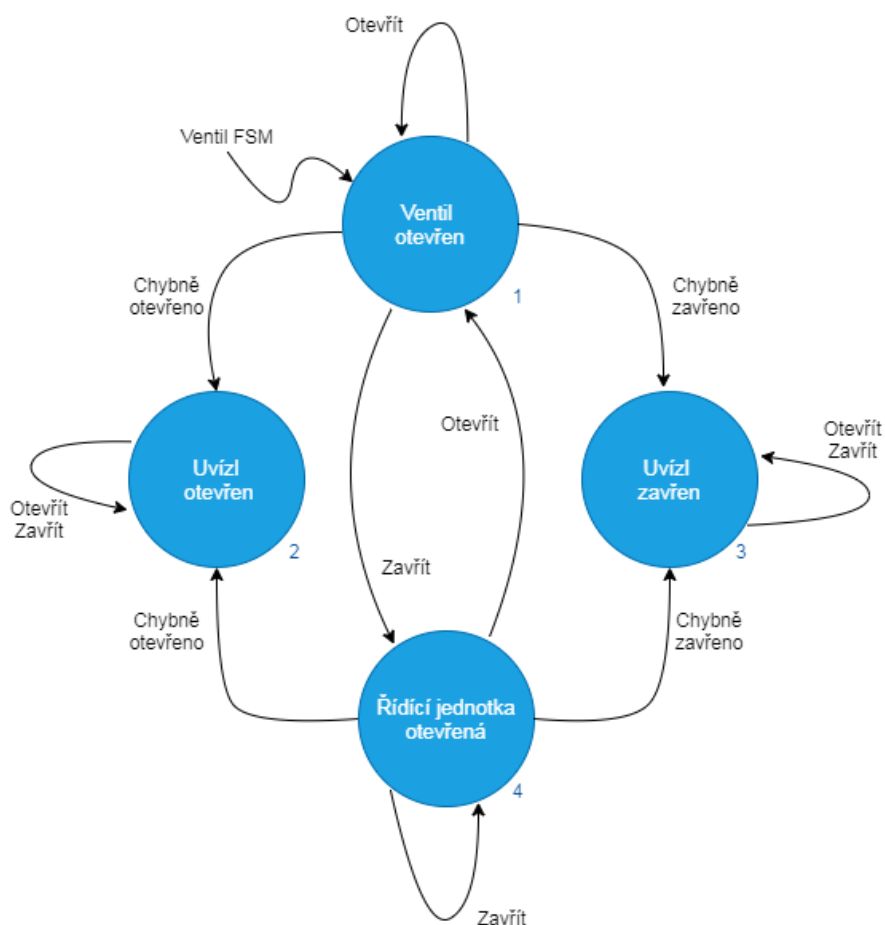
-Otevřít, 0, 0, Zavřít, 1, 1

- Je to nominální? **Ano i ne**

- Řekněme, že pozorujeme:

- Otevřít, 0, 0, Zavřít, 0, 0

- Je to nominální? **Ne**

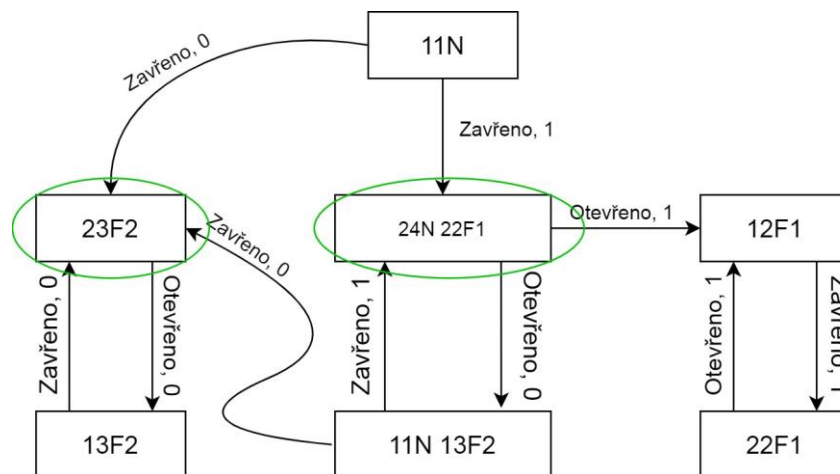


Obrázek 4-11 Příklad s uzavíráním ventilu s jednotkou FSM
[Zdroj: 8]

Řešením je použití komponent s bloky *FSM*, které sledují stav systému spolu s pozorovanými událostmi – bloky jsou možné stavy a diagnózy (poruchové události) a existuje postup, ze kterého lze stavět dané *FSM* [8].

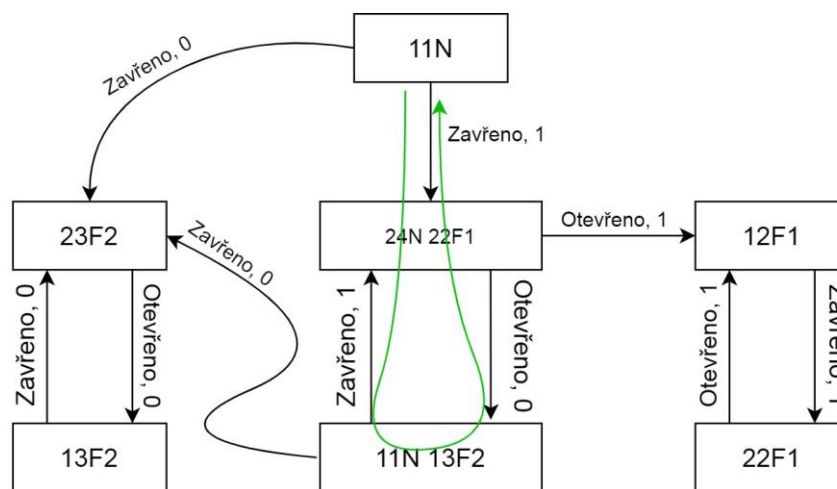
4.3.2 Praktické úvahy u diagnostiky systémů s diskretními událostmi

Začíná se v počátečních stavech obou automatů (11N), kdy u stavů systému je známo, že hodnoty jsou nominální. Pokud přikážeme zavřít a stav je měřen jako otevřeno, je tento prvek zařízení nebo diagnostiky vadný (došlo k selhání otevření). Pokud přikážeme zavřít a stav je měřen jako uzavřené, může, ale nemusí být tento prvek zařízení nebo diagnostiky vadný (mohlo dojít k chybnému zavření) [8].



Obrázek 4-12 Sledování povelů u diskretních událostech
[Zdroj: 8]

Posuzovací algoritmus by mapoval události na diagnózy. Tohle je v zásadě „napevno“ uvažující algoritmus a má schopnost zaručit, že nakonec budeme vědět, jestli došlo k poruchové události. Systém lze diagnostikovat, pokud po konečné době lze určit, že došlo k poruše během pozorované události [8].



Nediagnostikovatelné!

Obrázek 4-13 Příklad nemožnosti vlastní diagnostiky
[Zdroj: 8]

Důležité je dodržování přístupu diagnostického postupu:

- Porucha je *detekována*, jakmile dosáhneme stavu diagnostiky, kde blok obsahuje pouze chyby
- Porucha je *izolována*, jakmile dosáhneme stavu diagnostiky, kde blok obsahuje pouze konkrétní poruchu
- *Identifikace* zde není použitelná [8].

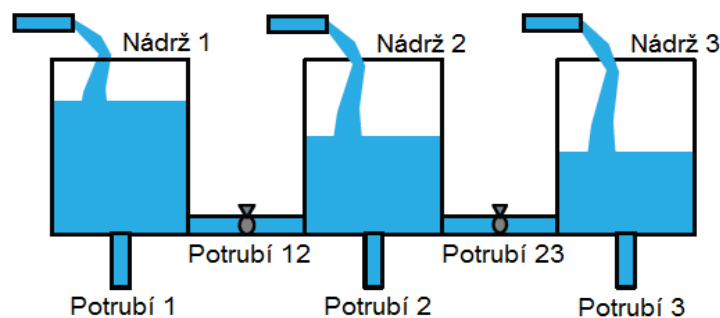
Potřeba vyvodit chování systému na *FSM*:

- U časově nepřetržitých systémů dochází k významné ztrátě informací
- Stále se musíme vypořádat se šumem snímače a abstraktními signály snímače k událostem
- *FSM* mohou náhle produkovat špatné výsledky [8].

4.4 Diagnostika spojitých systémů

4.4.1 Modelování diagnostických spojitých systémů

Spojitě chování systému zachyceno pomocí rovnic obyčejné diferenciální rovnice (*ODR*). Poruchy jsou pouze parametrické, tj. jsou modelovány jako změny parametrů v systému např. R_1 + zvýšení odporu R_1 v *Potrubí 1*. Pokud se tedy jedná o spojitě systémy, nepracujeme s poruchami diskretními. Poruchy mohou být náhlé nebo postupně narůstající a také mohou mít charakter trvalé nebo přerušované chyby [9].



Obrázek 4-14 Příklad systému pro popis spojitěho chování systému [Zdroj:6]

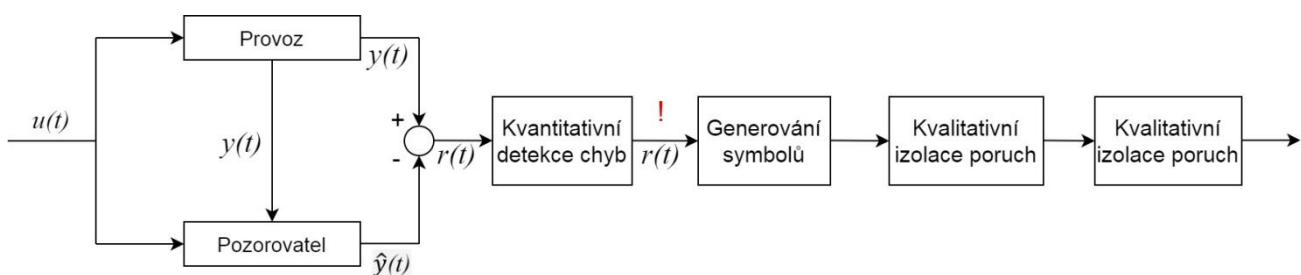
$\begin{aligned} dm_1 / dt &= u_1 - q_1 - q_{12} \\ p_1 &= m_1 / K_1 \\ m_1 &= \int dm_1 / dt \end{aligned}$	$\begin{aligned} q_1 &= p_1 / R_1 \\ q_1^* &= q_1 \end{aligned}$	$q_{12} = (p_1 - p_2) / R_{12}$
--	--	---------------------------------

Obrázek 4-15 Popis systému rovnicemi *ODR* [Zdroj: 9]

4.4.2 Praktické úvahy u diagnostiky spojitých systémů

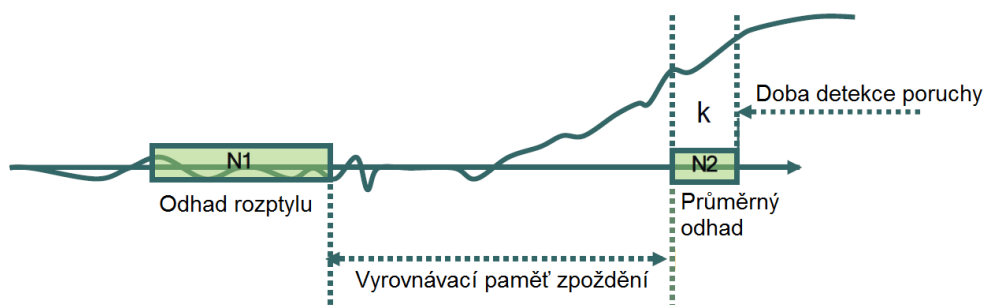
Problematika diagnostiky spojitých systémů řeší *detekci, izolaci a identifikaci* chyb a předpokládá prosté, přetrvávající parametrické poruchy, které mohou být náhlé nebo postupně rostoucí. Změny v parametrech způsobí změny ve výstupech systému a předpokládáme, že všechny související senzory byly ovlivněny [10].

Je potřeba zapojit model, který zohlední změny měřením způsobující odchylku výsledků vzhledem k různým možným poruchám. Záznam pořadí, ve kterém jsou pozorovány různé odchylky měření, může také indikovat poruchu. Provádí se také porovnání pozorované odchylky s očekávanými odchylkami u možných poruch, abychom diagnostikovali skutečnou poruchu [10].



Obrázek 4-16 Algoritmus pro diagnostiku spojitých systémů
[Zdroj: 4]

V tomto případě diagnostiky se zabýváme *zbytkovou generací poruch* – pozorovatel s pomocí filtru (např. Kalmanův filtr, částicový filtr...) na základě výpočtů místního nominálního submodelu počítá nominální chování jako referenci – zbytek vypočítaný jako rozdíl naměřené hodnoty a referenční hodnoty. Detekce poruch probíhá na pozorování chování od nominálního rezidua, což je přibližně nula. Porucha je tedy zjištěna, když je zbytková odchylka od nuly statisticky významná. Obvykle existuje zpoždění mezi výskytem poruchy a detekcí poruchy, čemuž se nelze vyhnout [10].



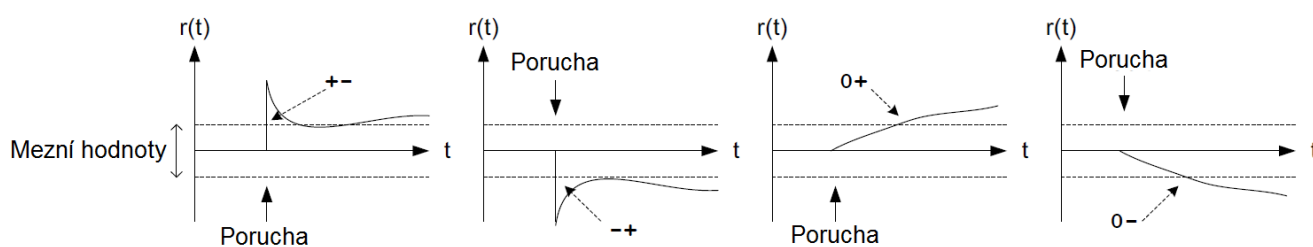
Obrázek 4-17 Ukázka detekce poruchy
[Zdroj: 10]

Jakmile je detekována porucha, každé měření je kvalitativně znázorněno jako symboly -0 (při nominální hodnotě), $+$ (nad nominální hodnotou) a $-$ (pod nominální hodnotou). Charakteristiky poruch kvalitativně zachycují předpokládaný účinek poruchy na měření pomocí symbolů uvedených v *Tabulce 1*. Všechny diskriminační důkazy pro izolaci poruch jsou poskytovány první změnou v zbytkové době od detekce poruchy [6].

- Znaky (popisovatele) chyb budou vystupovat na $\{(+ -), (- +), (0 +), (0 -)\}$
- $\{(++), (--)\}$ znamená pozitivní zpětnou vazbu, z toho plyne nestabilní systém

Tabulka 1 Charakteristiky pro popis detekce chyby

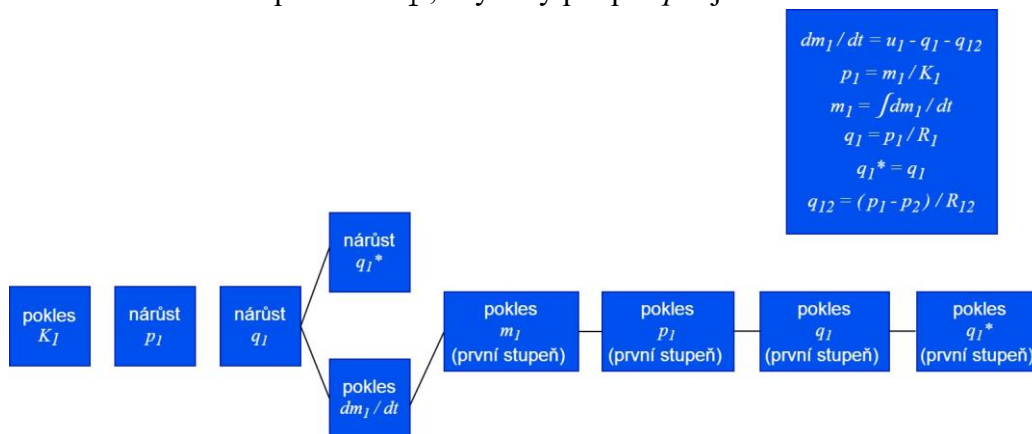
Porucha	p_1	p_2
C_1^-	$+-$	$0+$
R_2^+	$0+$	$0+$
C_2^-	$0+$	$+-$



Obrázek 4-18 Detekování poruch podle charakteristik detekce chyby [Zdroj:6, str.7]

Charakteristiky poruch jsou předpovědi toho, co zbytek systému udělá v reakci na poruchu. Tato informace je již v modelu zachycena, musí se však z něho extrahovat. Začneme s případovým modelem [6].

Příklad: Pro poruchu K_1^- , chybový podpis q_1^* je $+-$.



Obrázek 4-19 Příklad popisu návazností v charakteristice [Zdroj: 6]

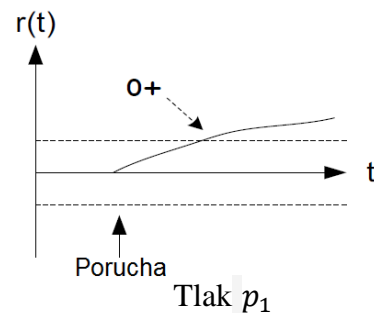
Poruchy jsou izolovány porovnáním kvalitativní odchylky v měření s předpokládanými poruchovými znaky. *Příklad:* Zvažme sadu chyb $F = \{C_1^-, R_2^+, C_2^+\}$ a sadu měření $M = \{p_1, p_3\}$, všechny poruchy mohou být jednoznačně izolované. Proto je systém s poruchami $F = \{f_1, \dots, f_l\}$ a měření $M = \{m_1, \dots, m_n\}$, diagnostikovatelný, pokud lze všechny jednotlivé poruchy v F jednoznačně izolovat pomocí M , tj. existuje alespoň jeden rozlišující podpis chyby mezi f_i a všemi ostatními poruchami v systému [6].

Tabulka 2 Vstupní charakterizace poruch

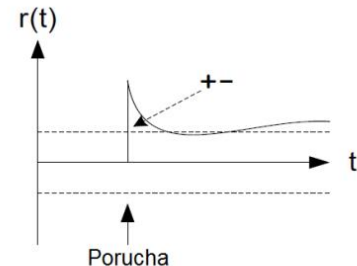
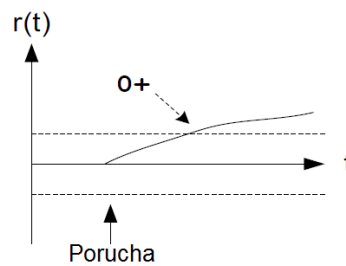
Porucha	p_1	p_3
C_1^-	+ -	0 +
R_2^+	0 +	0 +
C_2^-	0 +	+ -



Porucha	p_1	p_3
C_1^-	+ -	0 +
R_2^+	0 +	0 +
C_2^-	0 +	+ -



Porucha	p_1	p_3
C_1^-	+ -	0 +
R_2^+	0 +	0 +
C_2^-	0 +	+ -



Tlak p_1 Tlak p_3

Obrázek 4-20 Sledování průběhů jednotlivých poruch [Zdroj: 6]

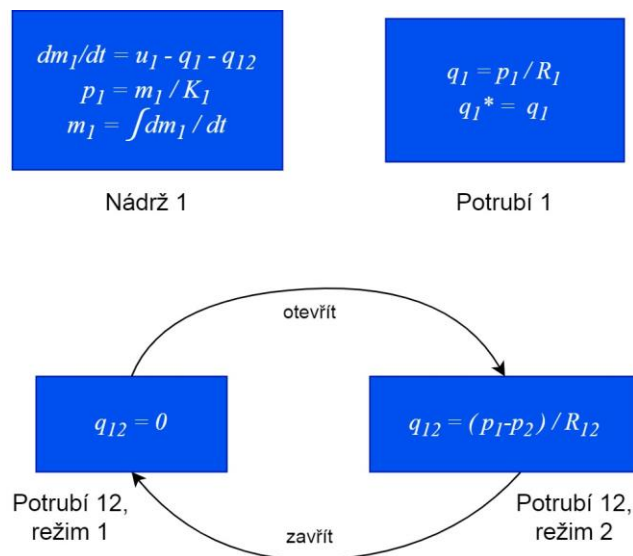
Při identifikaci poruchy nastupují další úkoly:

- *Problém s odhadem parametrů* – je potřeba definovat nové (chybové) hodnoty parametrů vzhledem k pozorovanému chybnému chování
- *Určení rámce odhadu* – použití dat z doby před t_d (čas detekce) do t (aktuální čas)
- *Alternativní přístup* – odvození submodelu vyjadřujícího neznámý parametr jako funkci známé / měřené proměnné [6].

4.5 Diagnostika hybridních systémů

4.5.1 Modelování diagnostických hybridních systémů

Hybridní systém kombinuje vlastnosti diagnostiky pro diskrétní události ale také pro spojitě chování. Diskrétní chování je zachyceno jako různé režimy systému a přechody mezi režimy modelovanými pomocí událostí, tedy v každém režimu je popis spojitěho chování. Z pohledu modelování komponentů definujeme režimy a úroveň komponent. Režimy na úrovni systému jsou definované jako specifikace režimů u každé součástky [11].



Obrázek 4-21 Schéma hybridního systému
[Zdroj: 11]

Poruchy lze modelovat jako vyjádření změny parametrů (spojitá část) pojmenované parametrické poruchy v kombinaci s modelováním poruch událostí/režimů (diskrétní část). Modelování poruchy jako parametrické nebo diskrétní je rozhodující pro tvorbu modelování:

- Často má větší smysl zaměřit se na jednu část modelování
- Například spínač, který se zasekne, lze modelovat jako odpor nabírající hodnotu nekonečno
- Parametr měnící svou hodnotu může být namodelován jako nový režim, kde má parametr novou hodnotu [11].

Přechody mezi režimy lze zadat různými způsoby, obvykle jsou klasifikovány následovně:

- Změny řízeného režimu jsou známé nebo přikázané, například zapnutí/vypnutí ventilu
- Autonomní změny režimu jsou nepozorované změny režimu, které jsou v závislosti na stavu systému, například průtok potrubím závisí na výšce potrubí a hladině vody v nádrži [11].

Je ovšem obtížné vypořádat se se změnami autonomního režimu, protože pak je obtížné sledovat stav hybridního systému. Pro každý režim systému můžeme odvodit charakteristiku poruchy:

- Pokud se režim nezmění během diagnostiky, je totožná s diagnostikou spojitých systémů
- Pokud se režim změní, pak musíme uvažovat o tom, v jakém režimu systém byl v době, kdy změna nastala a jestli nastalo zpoždění pozorování (např. kvůli k nedokonalým detektorům) [11].

4.5.2 Praktické úvahy u diagnostiky hybridních systémů

Uvažujeme jednotlivé poruchy, pozorujeme všechny přikázané režimy a předpokládejme, že zpoždění pozorování je dostatečně omezené. Algoritmus změny aktuální diagnózu nastavenou na základě nového pozorování a sledu předchozích pozorování (všechny nedávné změny režimu). Je potřeba zkontrolovat, zda současný pozorovaný podpis může spustit trasování poruch v režimu pro sub-algoritmus pro dosud nezměněné zbylé části [11].

4.6 Distribuovaná diagnóza

Centralizovaná diagnostická schémata mají určité problémy – drahé paměťové a výpočetní požadavky, které jsou špatně škálovatelné a také mohou selhávat. Distribuovaná diagnostická schémata řeší tyto problémy. Lze distribuovat všechny aspekty diagnostiky – *distribuovaná detekce*, *distribuovaná izolace* a *distribuovaná identifikace*. Distribuce u diagnostiky založené na modelu je klasifikována do:

- *Centralizované* – Vytvoří se jeden diagnostický přístroj z globálního modelu systému
- *Decentralizované* – Je použit globální model systému, ale distribuované diagnostické výpočty probíhají mezi více lokálními prostředky diagnostiky (diagnoseri). Místní diagnostická rozhodnutí jsou založena na podmnožině a tato rozhodnutí jsou sdělena jiným diagnostickým prostředkům nebo centrálnímu koordinátorovi [12].

V tomto pojetí je vhodné použít globální model ke generování globálně konzistentních výsledků. *Distribuce* znamená, že jsou použity modely v subsystému i když globální model je neznámý. Místní diagnostické přístroje pro každý subsystém komunikují své výsledky diagnostiky navzájem k dosažení globálního řešení [12].

- *Lokální diagnostikovatelnost* znamená, že poruchy v subsystému lze diagnostikovat skrze poruchy ve stejném subsystému.

Tabulka 3 Příklad určení lokální poruchy

Porucha	$p_{Nádrž1}$	$q_{Nádrž1}$	$p_{Nádrž2}$	$q_{Nádrž2}$
C_1^-	+-	+-	0+	0+
R_{12}^+	0+	0+	0-	0-
C_2^-	0+	0+	+-	+-
R_{23}^+	0+	0+	0+	0+

- *Globální diagnostikovatelnost* znamená, že poruchy v subsystému lze diagnostikovat ze všech ostatních poruch v systému [12].

Tabulka 4 Příklad přenesení lokální poruchy na globální systém

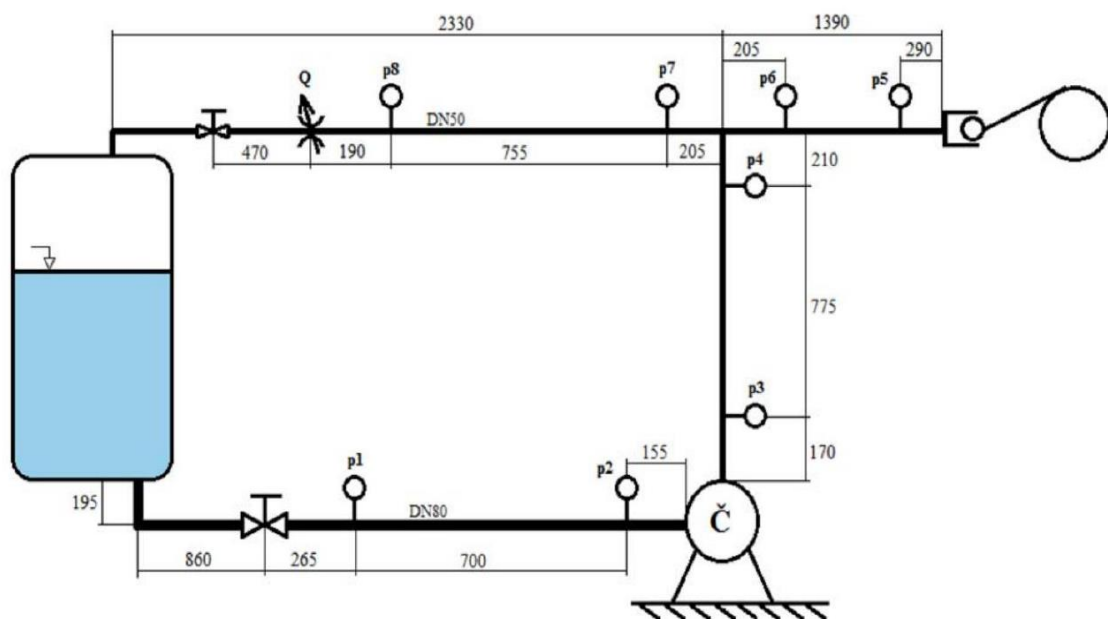
Porucha	$p_{Nádrž1}$	$q_{Nádrž1}$	$p_{Nádrž2}$	$q_{Nádrž2}$
C_1^-	+-	+-	0+	0+
R_{12}^+	0+	0+	0-	0-
C_2^-	0+	0+	+-	+-
R_{23}^+	0+	0+	0+	0+

Cílem je rozdělit diagnostický úkol do dílčích úkolů, které lze provést samostatně jednotlivými procesory. Globální (složený) model systému je analyzován *off-line*, aby bylo možné docílit návrhu distribuované lokální diagnostiky. Ta je schopna generovat globálně správné výsledky diagnostiky bez jakékoli koordinace a minimální nebo žádné výměny informací mezi sebou. Vyměňují se pouze pozorování, v nejlepším případě nejsou vyměňovány žádné výsledky [12].

5 SYSTEMATICKÝ ROZBOR – POPIS DIAGNOSTIKOVANÉHO SYSTÉMU

5.1 Prvotní určení systému

V této závěrečné práci je demonstrována diagnostika stroje pomocí modelu na konkrétním experimentu. Jedná se o hydraulický obvod sestavený na půdě Fakulty Strojního Inženýrství univerzity Vysoké učení technické v Brně. Obvod slouží k simulaci tlakových pulzací uvnitř uvedeného potrubního systému [13].

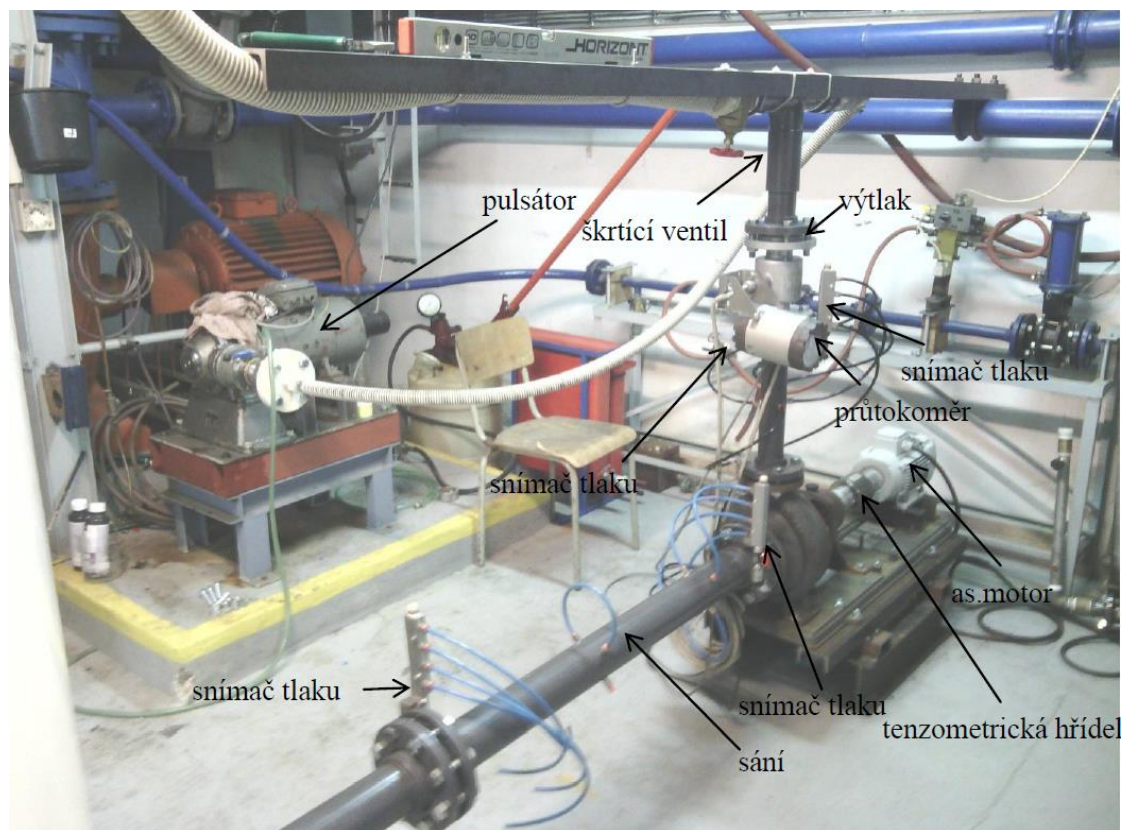


Obr. 5-1 Schéma hydraulického obvodu podléhajícímu diagnostice
[Zdroj: 13]

Na následující stránce je seznam použité techniky a fotografie sestrojeného hydraulického systému podle schémata [13].

Použitá technika:

- Čerpadlo BETA 12YC; asynchronní motor TM90-4xBC; 2,2kW; 400/230V; 50Hz; 1400ot/min; 9,5A; $\cos\varphi=0,83$; v.č.00296776
- Tenzometrická hřídel KTR, DATAFLEX 22/20, rozsah: $\pm 20\text{Nm}$
- Snímač tlaku DMP 331, výrobce BD SENSORS s. r. o. Uh. Hradiště, měřicí rozsah 0-4bar abs., přesnost $\pm 0,25\%$, proudový výstup 0 – 20 mA, $U_b=14-36\text{V DC}$
- Snímač tlaku DMP 331, výrobce BD SENSORS s. r. o. Uh. Hradiště, měřicí rozsah 0-2,5bar abs., přesnost $\pm 0,25\%$, proudový výstup 0 – 20 mA, $U_b=14-36\text{V DC}$
- Snímač tlaku DMP 331, výrobce BD SENSORS s. r. o. Uh. Hradiště, měřicí rozsah 0-6bar abs., přesnost $\pm 0,25\%$, proudový výstup 0 – 20 mA, $U_b=14-36\text{V DC}$
- Snímač tlaku DMP 331, výrobce BD SENSORS s. r. o. Uh. Hradiště, měřicí rozsah 0-10bar abs., přesnost $\pm 0,25\%$, proudový výstup 0 – 20 mA, $U_b=14-36\text{V DC}$
- Průtokoměr MQI 99-SN; 85-260V, 50Hz; 150 mA, IP67, 1,6MPa, $Q_{\max}=10\text{ l/s}$; v.č.09739
- Převodník Dewetron Dewe 30-8; 8 slotů; 115/230VAC; výstup 5V; v.č 52130599-CZE
- Měřicí karta National instruments NI – 9215, NI - 9222
- 3x klešťový ampérmetr 1146 Agilent; E3N 10A/1V; 100/1V



Obr. 5-2 Snímek hydraulického obvodu s tlakovým pulsátorem
[Zdroj: 14]

5.2 Určení systémových prvků na elementární úrovni

Čerpadlo BETA 12YC; asynchronní motor TM104-2:



*Obr. 5-3 Odstředivé čerpadlo BETA 12YC s asynchronním motorem TM104-2
[Zdroj: 15]*

Odstředivá čerpadla se skládají ze stacionárního tělesa čerpadla a oběžného kola, které je napojené na hřídel asynchronního motoru. Využívá se účinek odstředivé síly ke zrychlení čerpaného média, které se následně zbrzdí v difuzoru. Zbrzděním se získaná kinetická energie přemění na tlakovou. Pohyblivá část se skládá z oběžného kola s lopatkami, které se otáčí v spirálovité komoře. Vstup tekutiny je u osy rotoru, výstup na jeho obvodu. Regulovat průtok lze velmi jednoduše škrcením ve výtlačném potrubí [16].

Nárůst tlaku $\Delta p [Pa]$ v důsledku odstředivé síly při uzavřeném výstupu čerpadla, v závislosti na poloměru vstupu do rotoru $r [m]$ a výstupu z rotoru $R [m]$ při sekundových otáčkách rotoru $n [s^{-1}]$ a hustotě tekutiny $\rho_0 [kg/m^3]$ je možné přibližně vypočítat podle vztahu [17]:

$$\Delta p = 2\rho_0\pi^2n^2(R^2 - r^2) \quad (1)$$

Výpočet měrné energie čerpadla v měřených pracovních bodech podle vztahu:

$$Y = \frac{p_2 - p_1}{\rho} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g \cdot z \quad [J/kg] \quad (2)$$

kde

- p_2 je měřený tlak na výtlaku čerpadla $[Pa]$
- p_1 je měřený tlak v sacím potrubí $[Pa]$
- c_1 je střední rychlost tekutiny v místě tlakového snímače $p_1 [m/s]$
- c_2 je střední rychlost tekutiny v místě tlakového snímače $p_2 [m/s]$
- z je poloha snímače p_2 nad hladinou $[m]$
- g je gravitační zrychlení $[m/s^2]$
- ρ_0 je hustota čerpané tekutiny $[kg/m^3]$ [17].

Výpočet účinnosti:

$$\eta_e = \frac{\rho \cdot Q \cdot Y}{P_e} \quad (3)$$

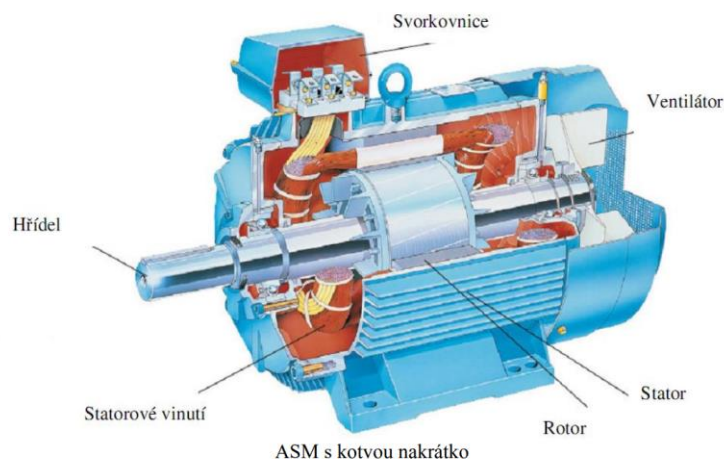
kde

- s je skluz [-]
- ρ je hustota [kg/m^3]
- Q je průtok [m^3/s]
- Y je měrná energie [J/kg]
- P_e je příkon elektromotoru [W] [17].



Obr. 5-4 Asynchronní motor TM104-2
[Zdroj: 18]

Asynchronní motor je výrobně nejjednodušší, a proto nejlevnější elektrický motor s vysokou spolehlivostí. Je nejčastěji používaným motorem, nevýhodou je pouze velký proudový náraz při rozběhu a induktivní účinník, způsobující jalové zatížení sítě. Napájíme-li trojfázové vinutí asynchronního motoru ze střídavé trojfázové sítě, vytvoří se v něm točivé magnetické pole. Točivé magnetické pole indukuje v rotorových vodičích napětí. Protože je rotorové vinutí uzavřeno, začne jím protékat rotorový proud, který vytvoří kolem vodičů magnetické pole rotoru. Vzájemným působením statorového a rotorového pole vznikne výsledné pole, které působí na rotorové vodiče silami. Působením těchto sil se začne rotor otáčet a vznikne točivý moment asynchronního motoru [19].



Obr. 5-5 Konstrukce asynchronního motoru s kotvou na krátko
[Zdroj: 19]

Rozdíl mezi rychlostí otáčení točivého magnetického pole a rychlostí otáčení rotoru nazýváme skluzovou rychlostí otáčení – *skluz*, který je vyjádřen v procentech. Výpočet skluzu:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100(\%) \quad (4)$$

kde

- s je skluz [s^{-1}]
- n_s jsou synchronní otáčky [s^{-1}]
- n jsou mechanické otáčky rotoru [19].

Skluz nabývá 1 až 10 %, přičemž obecně platí, že čím větší je stroj, tím nižší má skluz. Rychlost otáčení tohoto magnetického pole závisí na *frekvenci* napájecí sítě a na *počtu pólových dvojic* stroje:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \left[\frac{1}{\text{min}} \right] \quad (5)$$

kde

- f je frekvence
- p je počet pólových dvojic
- n_s jsou synchronní otáčky [19].

Otáčky točivého pole statoru, tj. *synchronní otáčky*, jsou dány kmitočtem napájecího napětí a počtem pólů trojfázového motoru. kde je kmitočet proudu a počet pólových dvojic statoru [19].

Pro regulaci chodu motoru potřebujeme znát *otáčky rotoru*:

$$n = n_1(1 - s) = \frac{60 \cdot f_1}{p} (1 - s) \quad (6)$$

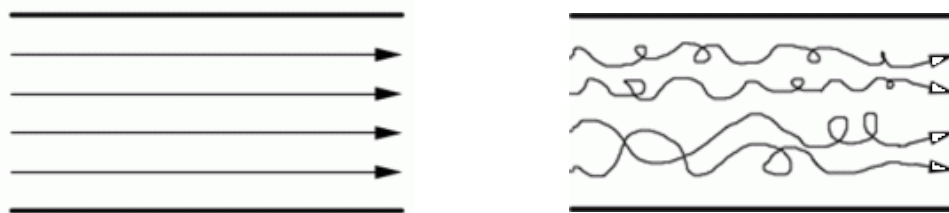
jsou tedy dány skluzem, kmitočtem napájecího napětí, a počet pólových párů. Regulovat otáčky tedy můžeme změnou kterékoliv z těchto veličin [19].

Ocelové potrubí DN50 a DN80:



*Obr. 5-6 Ukázka ocelového potrubí různých světlostí
[Zdroj: 20]*

Převažuje-li pohyb tekutiny v jednom směru, pak se hovoří o proudění, které je zapříčiněno rozdílem tlaků. Pohyb jednotlivých částic proudící tekutiny jsou znázorněny proudnicemi. Tečna sestavená v určitém bodě k proudnici určuje směr rychlosti pohybující se částice tekutiny v tomto bodě. Laminární proudění je bráno jako proudění bez vírů. Při turbulentním proudění se za tělesem tvoří víry. Tlak za tělesem je menší než před tělesem, a to způsobí růst odporové síly. Turbulentní proudění vody se projevuje např. šumem vody ve vodovodním potrubí [21].



*Obr. 5-7 a) Laminární b) turbulentní proudění.
[Zdroj: 21]*

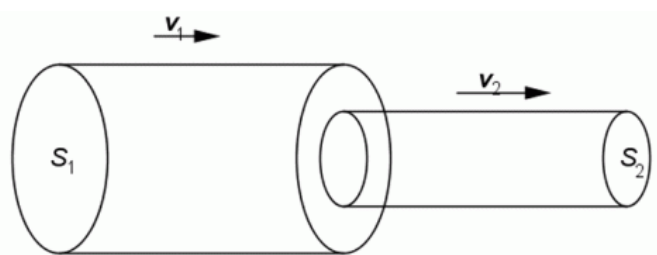
Je-li ustálené proudění ideální tekutiny vodorovnou trubicí. Protéká-li průřezem $S [m^2]$ částice tekutiny rychlostí $v [m/s]$, proteče jí za jednotku času $[s]$ tekutina o objemu $V [m^3]$. Objem tekutiny, který proteče daným průřezem trubice za jednotku času, se nazývá objemový průtok a značí se $Q_v [m^3/s]$ a vypočítá jako

$$Q_v = \frac{V}{t} \quad (7)$$

Je-li v rychlost proudící tekutiny, posune se za dobu t každá částice tekutiny průřezem trubice o dráhu $s = v \cdot t$. Označíme-li obsah průřezu S , je objem tekutiny $V = S \cdot v \cdot t$. Po dosazení dostaneme pro objemový tok

$$Q_v = S \cdot v \quad (8)$$

Objemový průtok měříme v jednotkách $m^2 \cdot m \cdot s^{-1} = m^3 s^{-1}$. Objem vody, která proteče daným potrubím za libovolnou dobu, měříme vodoměrem [21].



Obr. 5-8 Veličiny nutné k popisu proudění v trubici o různém průřezu.
[Zdroj: 21]

Objemový průtok je v libovolném průřezu trubice stejný, částice tekutiny se proto v užším místě trubice větší rychlostí a opačně. Je-li v průřezu S_1 rychlost proudu tekutiny v_1 , proteče jí za 1s objem stejný jako v průřezu S_2 , kde je rychlost proudu v_2 . Tedy [21]:

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 \quad (9)$$

Uvedený vztah se nazývá rovnice spojitosti nebo rovnice kontinuity. Z rovnice spojitosti vyplývá, že rychlost proudu tekutiny je nepřímo úměrná průřezu trubice. Dále je určena kinetická energie, kterou má proudící tekutina o jednotkovém objemu ve vodorovné trubici. Je-li m hmotnost nějakého tekutého tělesa a v jeho rychlost, má těleso kinetickou energii

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 \quad (10)$$

Je-li uvažován objem V jako objem tohoto tekutého tělesa, pak kinetická energie tekutiny o jednotkovém objemu je [22]:

$$\frac{E_k}{V} = \frac{1}{2} \frac{m}{V} v^2 = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (11)$$

Kinetická energie tekutiny o jednotkovém objemu je tedy větší v místě s menším průřezem. Přírůstek kinetické energie tekutiny v menším průřezu musí být podle zákona zachování energie vyrovnán úbytkem jiné energie – tlakové potenciální energie

$$E_p = mgh \quad (12)$$

kde h je výška sloupce tekutiny. Vztáhneme-li potenciální energii na jednotkový objem dostaneme:

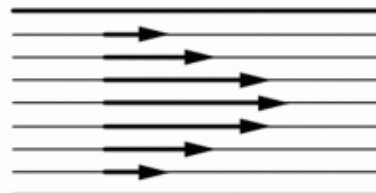
$$\frac{E_p}{V} = \frac{m}{V} gh = p \quad (13)$$

Protože v proudící tekutině se nemůže měnit mechanická energie v jiné formy energie, je součet kinetické a tlakové potenciální energie v jednotkovém objemu tekutiny pro oba průřezy trubice stejný. Platí tedy

$$\frac{1}{2} \rho v^2 + p = \text{kons.} \quad (14)$$

kde $p[\text{Pa}]$ je tlak. Tento vztah se nazývá Bernoulliho rovnice. Vyjadřuje zákon zachování energie ideální tekutiny proudící ve vodorovné trubici a platí i pro plyny [22].

Proudění reálné tekutiny nemá konstantní průběh podél průřezu potrubí – vrstva tekutiny ve styku se stěnami trubice se pohybuje nejmenší rychlostí nebo vzhledem ke stěnám trubice téměř v klidu. Po této tzv. mezní vrstvě tekutiny se posouvá další vrstva, jejíž rychlost je již vzhledem ke stěnám trubice větší. Největší rychlost mají pak částice tekutiny ve středu průřezu trubice [23].



Obr. 5-9 Zobrazení vektorů rychlostí jednotlivých vrstev podél průřezu potrubí
[Zdroj: 23]

Velikost vnitřního tření můžeme měřit silou F_t , které je zapotřebí, aby se deska plochy S pohybovala rovnoměrnou rychlostí v v tekutině ve vzdálenosti z od stěny. Závislost můžeme vyjádřit Newtonovým vzorcem

$$F_t = \eta S \frac{v}{z} \quad (15)$$

Konstanta úměrnosti η se nazývá dynamická viskozita. Čím větší je toto číslo, tím větší síly vnitřního tření v tekutině vznikají. Změnu rychlostí jednotlivých vrstev tekutiny vyjadřujeme rychlostním spádem, tzv. gradientem rychlosti g_t , který udává změnu rychlosti Δv připadající na jednotku délky ve směru kolmém na rychlost pohybu. Vyjadřuje se [23]:

$$\tau = \frac{F_t}{S} = \eta \frac{\Delta v}{\Delta l} \quad (16)$$

Vztah určuje sílu připadající na jednotku plochy desky a udává tečné (tangenciální) napětí, které vzniká uvnitř tekutiny při jejím pohybu. Součinitel η je dynamická viskozita, která závisí na složení tekutiny a teplotě. Jednotkou je $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1} = \text{Nsm}^{-2}$. Hodnota dynamické viskozity u tekutin s rostoucí teplotou klesá, u plynů stoupá. Je vhodné zmínit se o rozdělení tření – vnitřní (mezivrstevní) je závislé od vzdálenosti od středu průřezu k nádobě, a vnější – v kontaktu s povrchem nádoby. U vnějšího však můžeme uvažovat o rychlosti blížící se k 0, proto je jeho hodnota zanedbatelná. Z faktu že rychlost proudění skutečné tekutiny nemá konstantní průběh v ose průřezu potrubí, zavádíme tzv. střední rychlost proudu, která je ekvivalentní. Pro objemový průtok Q_v , která projde za laminárního proudění trubici, platí [23]:

$$Q_v = \frac{\pi \Delta p}{8 \eta l} r^4 \quad (16)$$

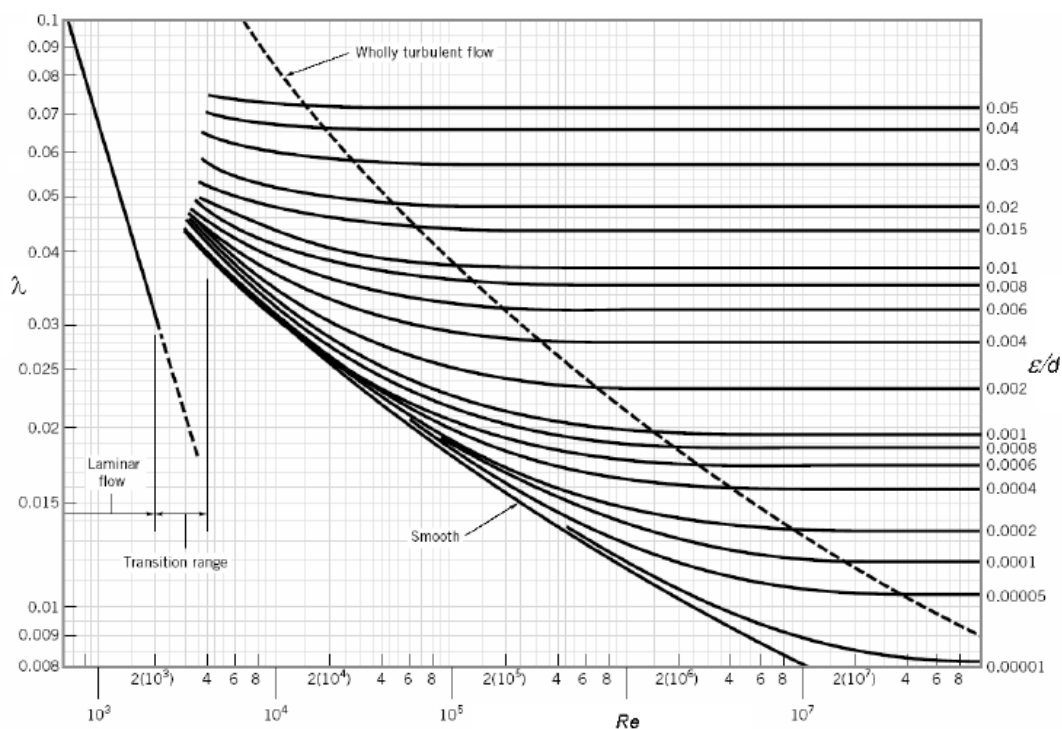
Proudění má v každém bodě nepravidelný pohyb, tedy rychlost a zrychlení se mění s časem nepředvídatelně. Bezrozměrná veličina Reynoldsovo číslo Re charakterizuje každý tok v turbulentní oblasti a je popsáno vztahem

$$Re = \frac{d\rho v}{\eta} \quad (16)$$

kde

- d je délka charakteristického rozměru tělesa (např. průměr trubice)
- ρ je hustota tekutiny
- η dynamická viskozita
- v je střední rychlost tekutiny [23].

Podle pokusů laminární proudění v hladkých trubicích přechází v turbulentní tehdy, když Reynoldsovo číslo dosáhne kritické hodnoty Re_k . Měření ukázala, že hodnota Re_k je cca 2000 (2400) [24].



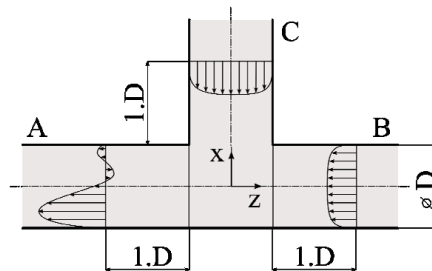
Obr. 5-10 Charakteristiky laminárního a turbulentního proudění tekutin v závislosti na Reynoldsově číslu [Zdroj: 24]

Tvarová součást T-kus DN50:



*Obr. 5-11 Tvarová součást T-kus DN50
[Zdroj: 25]*

Tvarová součást T-kus (nebo také T-spojka) slouží ke spojení vícero potrubí a vytváření nového toku ve výstupním potrubí. Proudění tekutiny je provedeno v křižovatce T s úhlem 90° sousední větve a s průměrem 50 mm každé větve. Tok je organizován jako kombinovaný tok, to znamená, že existují dvě vstupní větve a pouze jedna výstupní větev. Tlakový spád uvnitř T-spojky je podrobněji rozebrán v literatuře [26].



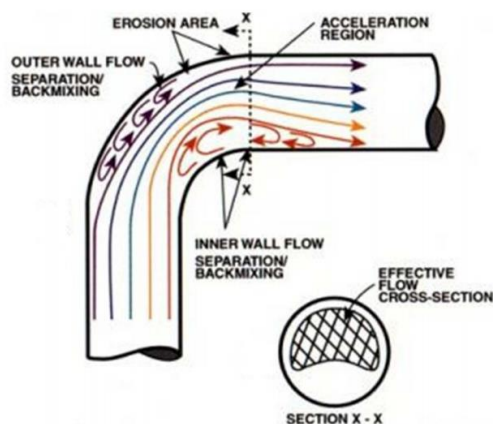
*Obr. 5-12 Vektory rychlostí v jednotlivých průřezech potrubí
[Zdroj: 26]*

Tvarová součást – koleno 90° DN50 a DN80:



*Obr. 5-13 Tvarová součást – koleno 90°
[Zdroj: 27]*

Tvarová součást koleno 90° slouží k napojení dvou potrubí, kterých osi svírají 90° . V důsledku postupného natáčení průřezu vůči přímé ose a průchodem tekutiny touto oblastí dochází ke ztrátám – úbytkům rychlosti a tím pádem zvýšením tlaku v systému. Podle provedených experimentů je také znatelné ovlivnění podstaty proudění z laminární na turbulentní. Podrobněji v literatuře [28].



Obr. 5-14 Zobrazení chování proudění tekutiny v oblasti natočeného průřezu o 90°
 [Zdroj: 28]

Škrticí ventily klapkové DN50 a DN80:



Obr. 5-15 Dvojitý excentrický klapkový ventil DN50 A21WCB
 [Zdroj: 29]

Škrticí klapkový ventil slouží k přímé regulaci průtoku média. Pomocí uzavíracího dříku (ovládaného ručně/automatizovaně) se excentricky vychyluje nebo vrací do zavřené polohy. V počátku experimentu a simulace je škrticí ventil plně otevřen a postupným vrácením klapky do středové polohy je bráněno tekutině v průtoku a tím se průtok snižuje.

Nádrž:



*Obr. 5-16 Nádrž na vodu 1000 l (ilustrační foto)
[Zdroj: 30]*

Nádrž na vodu můžeme považovat za rezervoár, tedy zdroj vody. Skládá se z nepropustné nádoby s kruhovou podstavou s průměrem 105 cm a výškou 130 cm , což činí zaokrouhleně $1,126\text{ m}^3$. Jejím hlavním účelem je zásobovat hydraulický obvod oběžným médiem, což je v našem případě destilovaná voda o teplotě cca 20°C . Nádrž také obsahuje 2 ústí (otvory), které nepřímo reprezentují připojení sání a výtlačku čerpadla. Jelikož nádoba není plně napuštěná, otvor reprezentující výtlaček čerpadla není v kontaktu s hladinou vody, tím pádem dochází k vyrovnání tlaku s tlakem atmosférickým, což je v naší oblasti něco zhruba 101 kPa . Otvor vedoucí k sání čerpadla považujeme napojený k nádobě s vodou v určité hloubce pod hladinou vody.

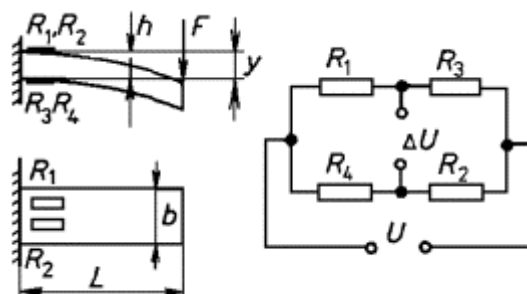
Tenzometrická hřídel KTR, DATAFLEX 22/20:



*Obr. 5-17 Tenzometrická hřídel KTR DATAFLEX 22/20
[Zdroj: 31]*

U tenzometru se využívají pružné členy různé konstrukce pro převod měřené síly (tahové i tlakové) na deformaci. Ta se potom měří odporovými tenzometry. Na deformačním členu jsou na vhodném místě nalepeny odporové tenzometry tak, že vytvářejí odporový můstek. Tenzometry umožňují realizaci snímačů sil v největším rozsahu a s vysokou přesností. Relativní chyba dosahuje u některých konstrukcí jen 0,04%. Pro zvýšení citlivosti se zapojuje do jedné větve více tenzometrů. Proud procházející snímačem je limitován dovoleným oteplením [31].

Princip funkce tenzometrického snímače síly s pružným členem ve tvaru vetknutého nosníku je nejčastěji užívaný senzor. Odporové tenzometry R_1 a R_2 jsou přilepeny na horním a tenzometry R_3 a R_4 na spodním povrchu nosníku. Při naznačeném silovém působení jsou horní tenzometry namáhány na tah a spodní na tlak [31].



Obr. 5-18 Návrh deformace senzoru a schéma zapojení senzoru
[Zdroj: 31]

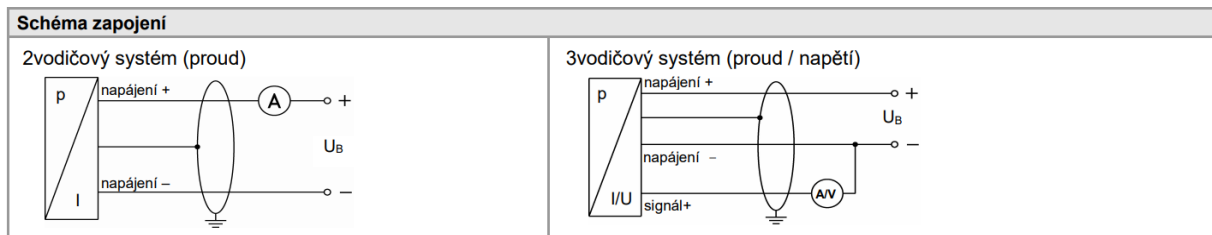
Průhyb y pružného nosníku při známém modulu pružnosti v tahu E a působení síly F na rameno o délce L je dán dle [31]:

$$y = \frac{F \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I} = \frac{2 \cdot F \cdot L^2}{3 \cdot E \cdot W \cdot h} \quad (17)$$

Snímač tlaku DMP 331 BD SENSORS:



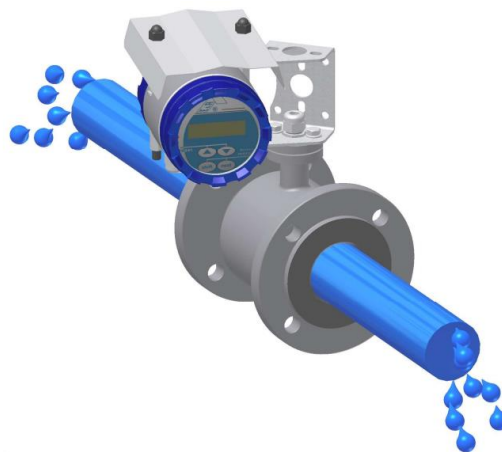
Obr. 5-19 Snímek snímače tlaku DMP 331
[Zdroj: 32]



Obr. 5-20 Schéma zapojení snímače tlaku na převod signálu
[Zdroj: 32]

Snímače převádějí tlak plynů a kapalin na elektrický signál. Základním prvkem snímačů DMP 331 a DMP 333 jsou nerezová čidla tlaku, těsněná v pouzdře O-kroužkem, s přivařenou oddělovací membránou a oddělovací náplní s inertním olejem. Při působení tlaku dává polovodičové čidlo výstupní napěťový signál. Tento signál je teplotně kompenzován a pomocí vestavěné elektroniky zesílen a normován [32].

Průtokoměr MQI 99-SN:



Obr. 5-21 Model průtokoměru MGI 99-SN
[Zdroj: 33]

Měření je založeno na principu Faradayova zákona o elektromagnetické indukci, podle něhož se v elektricky vodivém tělese, pohybujícím se v magnetickém poli, indukuje elektrické napětí. Pro toto napětí platí následující vztah (obecně):

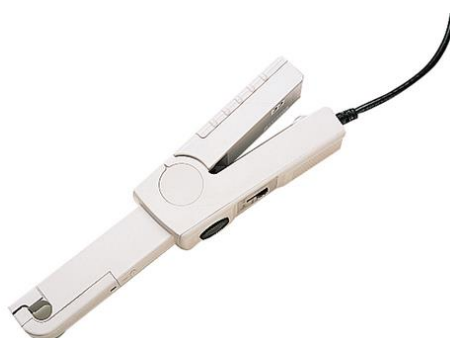
$$U = B \cdot D \cdot \vec{v} \quad (17)$$

kde

- U je indukované napětí [V]
- B je magnetická indukce [T]
- D je průměr potrubí [m]
- \vec{v} je vektor střední průtočné rychlosti [m/s] [33].

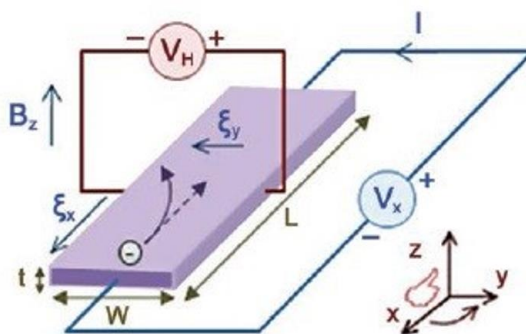
Jsou-li magnetická indukce pole B i průměr potrubí D konstantní, pak indukované napětí je úměrné střední rychlosti proudění tekutiny. Tekutina protéká průtokoměrem kolmo na směr magnetického pole. Pohybem liny, která musí mít určitou minimální elektrickou vodivost, indukuje se určité elektrické napětí snímané dvěma elektrodami umístěnými kolmo na směr magnetického pole i směr průtoku. Magnetické pole průtokoměru je vytvářeno budícím proudem s obdélníkovým průběhem, který je generován v převodníku a přiveden na budící vinutí snímače. Systém vynuceného proudu zabezpečuje konstantní buzení za všech okolností, které se v provozu mohou vyskytnout [33].

Klešťový ampérmetr 1146 Agilent:



Obr. 5-22 Klešťový ampérmetr 1146 Agilent
[Zdroj: 34]

Magnetické pole svou silou vychyluje elektrony, které proudí vodičem, ty se hromadí u jedné ze stran vodiče, a tím vznikne napětí, které lze měřit. Hall použil pro své pokusy velice tenkou kovovou fólii. Dnes se v praxi ovšem používá polovodičová destička s malou koncentrací nosičů nábojů. Díky tomu je jev snadněji měřitelný. Hallova sonda je umístěna v magnetickém obvodu kleští, a tedy kolmo na magnetické pole. Změny magnetického pole se převedou na změny měřitelného „Hallového napětí“, které dále zpracují a vyhodnotí digitální obvody. Díky tomu mohou klešťové ampérmetry měřit i stejnosměrný proud. V praxi se často používá kombinace proudový transformátor + hallova sonda, takto vybavený „klešťák“ umožňuje měření střídavého i stejnosměrného proudu [35].



Obr. 5-23 Princip Hallova jevu
[Zdroj: 35]

Tlakový pulsátor – hydraulický píst:



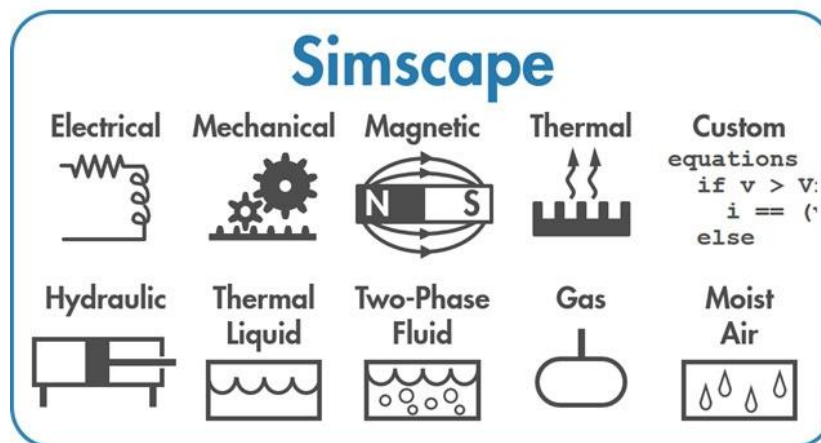
*Obr. 5-24 Použitý tlakový pulsátor (hydraulický válec a motor s vačkou)
[Fotografie přístroje pořízena v květnu 2021]*

Tlakový pulsátor se skládá z hydraulického pístu přivádějícího nárůst tlaku do hydraulického systému. Hydraulický píst je poháněn motorem a síla je převáděna pomocí vačky tak jak je naznačeno v schématu. Pro zjednodušení uvažujeme, že přístroj je napojen na obvod a jeho úkolem je vyvolávat tlakové pulzace v potrubním systému o určité frekvenci a amplitudě.

6 SYSTEMATICKÝ ROZBOR – TVORBA DIAGNOSTICKÉHO MODELU

6.1 Tvorba matematicko-fyzikálního modelu – Simulační prostředí

Tvorba diagnostického modelu na potřebné úrovni je provedena v prostředí, které simuluje matematicko-fyzikální modely, které přímo interagují v blokových diagramech a jiných paradigmatech prostředí. Mezi odborníky v technické praxi, kteří se potýkají s tvorbou fyzikálních systémů, je používán program Simulink™ od společnosti Mathworks. Právě tato nadstavba dokáže vytvářet a simulovat fyzikální systémy pomocí MATLAB-založeném jazyku Simscape. Právě v něm je možno vytvářet modely pomocí fyzikálních komponent z rozličných oblastí až celých knihnic modelů [36].



Obr. 6-1 Oblasti spadající pod simulační program Simscape [Zdroj: 36]

Pro diagnostiku systému pomocí modelů je zapotřebí vybrat komponenty z kategorie *Electrical* a *Mechanical*. Původní více samostatný program Simhydraulics™ se stal základem pro Simscape-knižnice komponentů kategorie *Fluids* a ta se později rozdělila na další podkategorie. Jedna z nich s názvem *Hydraulic* slouží ke stavění hydraulických obvodů a jiných oběhových systémů [36].

6.2 Tvorba matematicko-fyzikálního modelu – Implementace diagnostických prvků do modelů

V této kapitole bude představen diagnostický model v programu Simulink™. Celý diagnostický systém je naprogramován tak, jak určuje podstata a vlastnosti každého prvku systému – hydraulického obvodu s čerpadlem poháněného asynchronním motorem. Diagnostický systém je představen od nejhlubší úrovně pro pochopení fundamentálních bloků, přes subsystémy pro určení skupin bloků až po zapojení subsystémů do celkového funkčního modelu.

Čerpadlo BETA 12YC; asynchronní motor TM104-2:



Obr. 5-3 Odstředivé čerpadlo BETA 12YC
s asynchronním motorem
[Zdroj: 15]



Obr. 6-2 Blok odstředivého čerpadla
v prostředí Simulink
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]

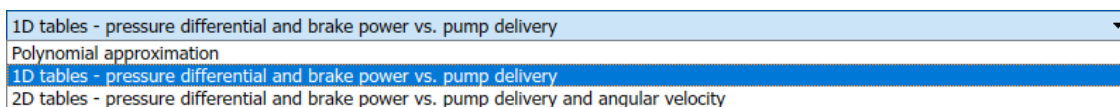
Napájecí porty s jinými bloky:

- P – Výstup čerpadla – Připojení výstupní brány čerpadla reprezentující výtlak čerpadla
 - T – Vstup čerpadla – Připojení vstupní brány čerpadla reprezentující sání čerpadla
 - S – Mechanické připojení čerpadla – Připojení výstupní hřídele elektromotoru na střed oběžného kola čerpadla
- Konvence zapojení hydraulických komponent káže, že kladný směr působení je od portu T ku portu P .

Vstupní parametry:

- Otáčky čerpadla: $\omega = 1400 \text{ ot/min}$
- Hustota vody: $\rho = 977 \text{ kg/m}^3$

Další parametry bylo potřeba nadefinovat tak, aby simulační program napodobňoval průběh čerpadla v celém jeho pracovním rozsahu. Zvolená varianta využívá způsob zavedení datové tabulky složené z vektorů, kterých složky pro $i = 1..n$ jsou hodnoty vybrané veličiny zaznamenané ve stejný okamžik. Tato tabulka dokáže spojit jednotlivé členy vektorů a tím svázat průběhy veličin, podle kterých požadujeme, aby se model stroje choval.



Obr. 6-3 Definování charakteru vstupních dat čerpadla
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]

Jedná se konkrétně o tyto parametry s počtem měření (záznamu) $i = 1..14$, Měření uvažuje jednu sadu dat zvanou statická charakteristika okruhu, kdy není na čerpadlo přiváděn žádný výkon a dalších $i = 1..14$ průběhů se záznamy veličin:

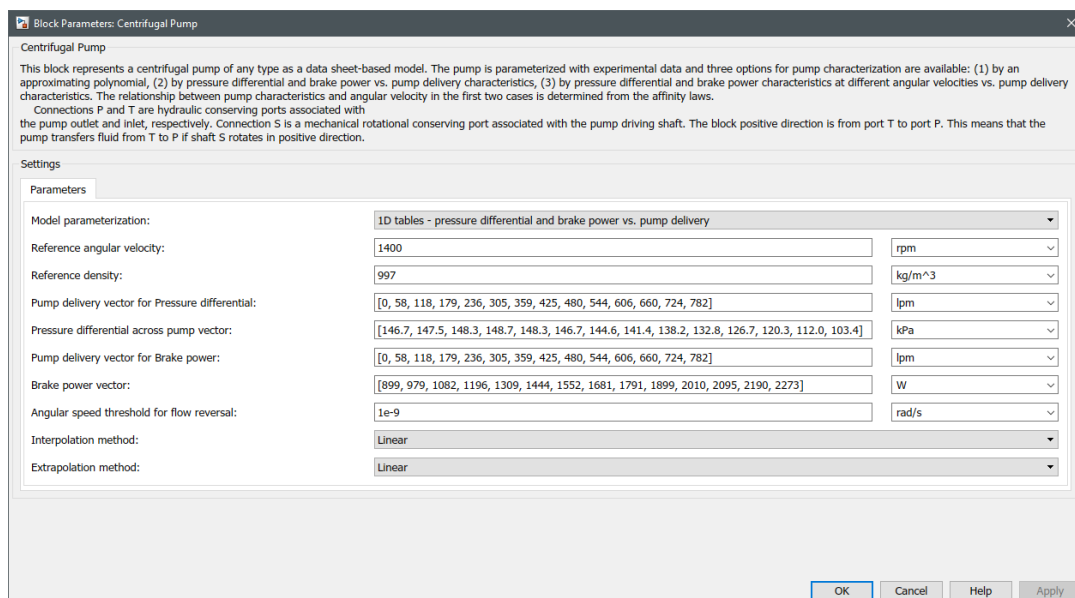
- Hmotnostní průtok $q \text{ [l/m]}$
- Rozdíl tlaků před čerpadlem a za čerpadlem $\Delta p \text{ [kPa]}$
- Mechanický výkon $P_m \text{ [W]}$

Tabulka zaznamenaných hodnot:

Tabulka 5 Charakteristiky pro definici modelu čerpadla

Číslo charakteristiky	q [l/s]	q [l/m]	p_3 [kPa]	p_2 [kPa]	Δp [kPa]	Mech. výkon [W]
1(15)	0.0	0.0	108.4	104.8	3.5	0.0
2(14)	0.0	0.0	255.4	108.7	146.7	898.6
3(13)	1.0	58.2	255.8	108.3	147.5	979.2
4(12)	2.0	118.2	256.4	108.1	148.3	1082.3
5(11)	3.0	179.4	256.5	107.8	148.7	1196.0
6(10)	3.9	236.4	255.7	107.4	148.3	1309.0
7(9)	5.1	305.4	253.2	106.6	146.7	1444.1
8(8)	6.0	359.4	250.5	105.9	144.6	1552.8
9(7)	7.1	424.8	246.4	104.9	141.4	1680.8
10(6)	8.0	480.0	242.3	104.1	138.2	1791.1
11(5)	9.1	543.6	235.4	102.7	132.8	1899.1
12(4)	10.1	606.0	228.2	101.5	126.7	2009.5
13(3)	11.0	660.0	220.3	100.0	120.3	2095.4
14(2)	12.1	723.6	210.4	98.3	112.0	2189.1
15(1)	13.0	782.4	199.9	96.4	103.4	2273.5

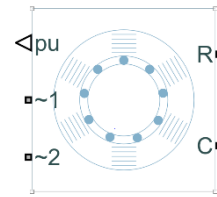
Vložení dat do simulačního bloku:



Obr. 6-4 Možnosti nastavení bloku odstředivého čerpadla
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]



Obr. 5-4 Asynchronní motor TM104-2
[Zdroj: 18]



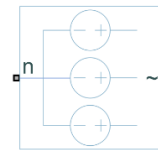
Obr. 6-5 Blok asynchronního motoru
v prostředí Simulink
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]

Napájecí porty s jinými bloky:

- 1 – Elektrické zapojení 1 – Připojení asynchronního stroje na zdroj střídavého napětí 400V
 - 2 – Elektrické zapojení 2 – Připojení asynchronního stroje na elektrickou referenci, která reprezentuje uzemnění stroje
 - R – Výstupní mechanická reference – Výstupní hřídel elektromotoru
 - C – Vstupní mechanická reference – Mechanická rotační reference pro dynamické výpočty
 - pu – Výstup snímače mechanických vlastností – Výstup měřených signálů veličin elektromotoru
- Konvence zapojení rotačních mechanických komponent káže, že kladný směr působení je od portu C ku portu R.

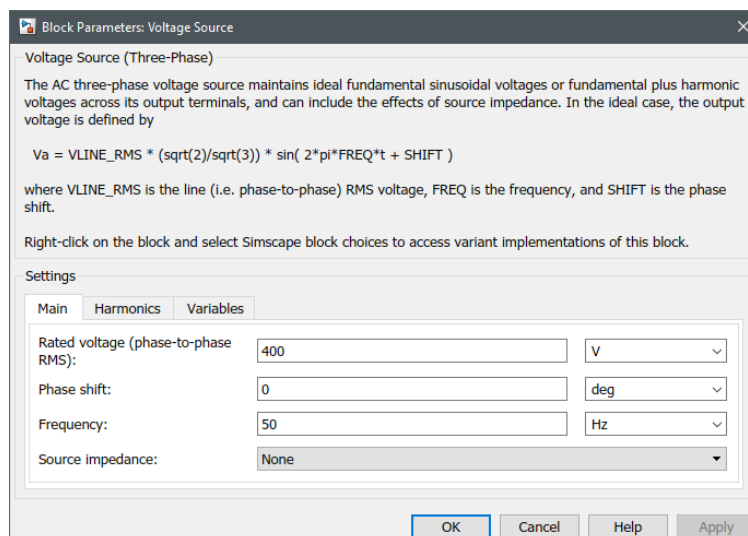
Související bloky:

- Zdroj střídavého napětí – Blok zdroje napětí (třífázový) modeluje ideální třífázový zdroj napětí nebo třífázový zdroj napětí s harmonickými vlnami.



Obr. 6-6 Blok střídavého napětí v prostředí Simulink
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]

Vložení dat do simulačního bloku:



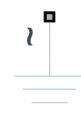
Obr. 6-7 Možnosti nastavení bloku zdroje 3-fázového napětí
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]

- *Elektrická reference* – Blok zdroje představuje uzemnění. Elektrické porty všech bloků, které jsou přímo připojeny k zemi, musí být připojeny k elektrickému referenčnímu bloku.



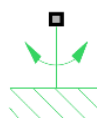
Obr. 6-8 Blok elektrické reference v prostředí Simulink
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]

- *Elektrická reference (3-fázová)* – Blok zdroje představuje uzemnění podobné jako předešlé. Rozdíl je pouze v určení zemničního neutrálu pro modelové porty *a, b, c*. Používá se v simulaci s 3-fázovým motorem.



Obr. 6-9 Blok elektrické reference (3-fázové) v prostředí Simulink
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]

- *Mechanická rotační reference* – Blok reprezentující referenci základního tělesa, vůči němu jsou vztaženy souřadné systémy pro výpočty pohybových rovnic.



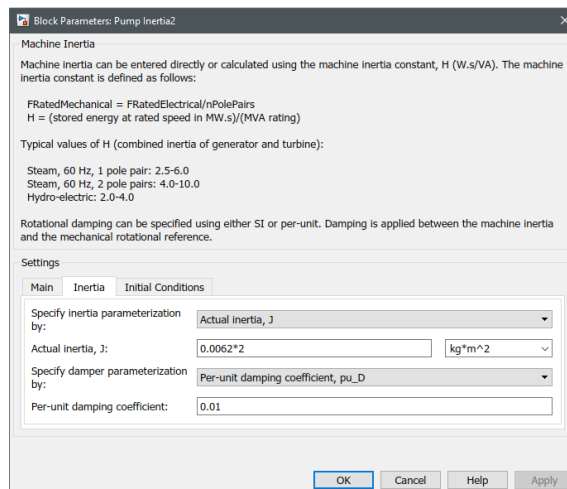
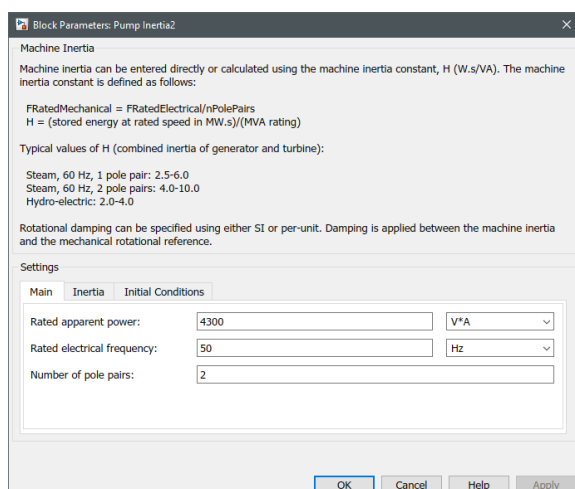
Obr. 6-10 Blok mechanické rotační reference v prostředí Simulink
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]

- *Mechanická rotační setrvačnost* – Blok reprezentující simulovaný moment setrvačnosti částí stroje, která se odráží na výsledném výstupním momentu. Obsahuje informace o konstrukci stroje a hodnotě momentu setrvačnosti, která činí $0,0062 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. Tato hodnota je vynásobena 2-krát kvůli dvojici pólových párů.



Obr. 6-11 Blok mechanické rotační setrvačnosti v prostředí Simulink
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]

Vstupní parametry:



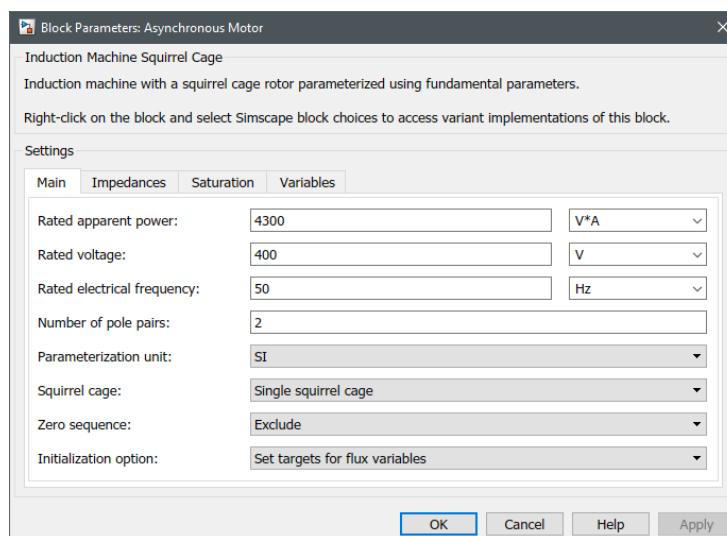
Obr. 6-12 Možnosti nastavení bloku mechanické rotační reference a) záložka „Hlavní“
b) záložka „Setrvačnost“
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]

Vstupní parametry:

Jako první je potřeba vyjmenovat základní charakteristiky motoru, které definují konstrukci motoru

- *Jmenovitý zdánlivý výkon:* $S_j = 4300 \text{ VA}$
- *Jmenovité napětí:* $U_j = 400 \text{ V}$
- *Jmenovitá frekvence napětí:* $f = 50 \text{ Hz}$
- *Počet elektromagnetických pólů:* 2

Vložení dat do simulačního bloku:

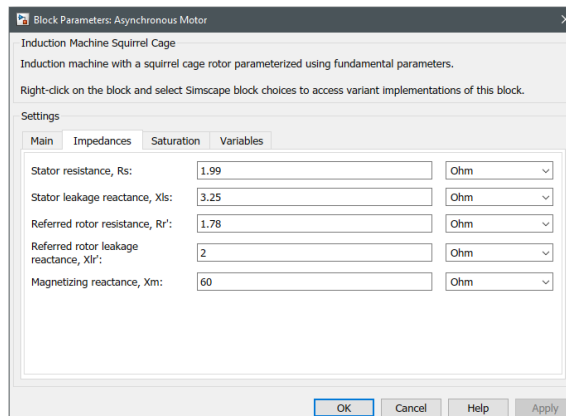


Obr. 6-13 Možnosti nastavení asynchronního motoru – záložka „Hlavní“
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]

Následně je zapotřebí uvážit hodnoty impedancí motoru, které určují charakteristiky elektromagnetického motorického napětí skrze

- *Odpor statoru:* $R_S = 1,99 \text{ Ohm}$
- *Rozptylová reaktance statoru:* $X_{lS} = 3,25 \text{ Ohm}$
- *Přepočtený odpor rotoru:* $R_r' = 1,78 \text{ Ohm}$
- *Přepočtená rozptylová reaktance rotoru:* $X_{lr} = 2 \text{ Ohm}$
- *Magnetizační reaktance:* $X_m = 60 \text{ Ohm}$

Vložení dat do simulačního bloku:



*Obr. 6-14 Možnosti nastavení asynchronního motoru – záložka „Impedance“
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]*

V modelu motoru je možnost zapnutí saturace magnetické energie, kterou však v případě této simulace zanedbáme.

Ocelové potrubí DN50 a DN80:



*Obr. 5-6 Ukázka ocelového potrubí různých světlostí
[Zdroj: 20]*



*Obr. 6-15 Blok hydraulického potrubí v prostředí Simulink
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]*

Napájecí porty s jinými bloky:

- *A* – *Vstupní otvor potrubí* – Připojení reprezentuje otvor, kterým médium přitéká
- *B* – *Výstupní otvor potrubí* – Připojení reprezentuje otvor, kterým médium odtéká
- Konvence zapojení hydraulických komponent káže, že kladný směr působení je od portu *A* ku portu *B*.

Související bloky:

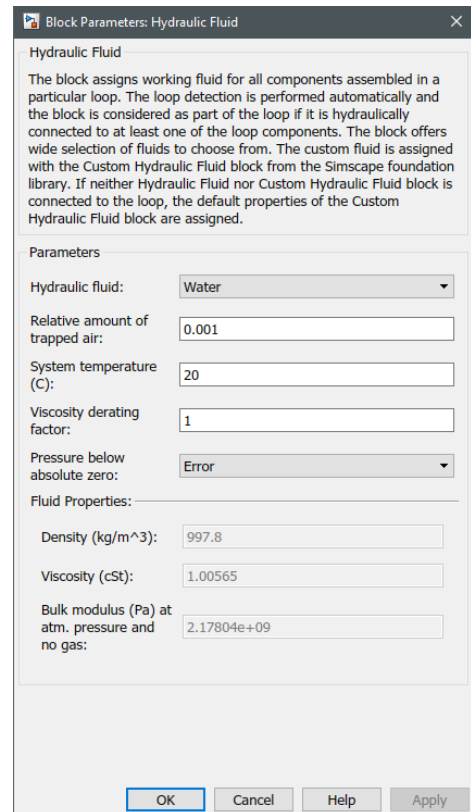
- *Hydraulická kapalina* – Blok hydraulického média proudícího v obvodě. Tento blok je nositelem informací, které jsou zpracovány ve všech jiných blocích zapojených do obvodu.



Obr. 6-16 Blok hydraulické kapaliny v prostředí Simulink

[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]

- Kapalina v simulaci je definována jako *destilovaná voda* s teplotou 20°C.
- Simulační blok uvažuje s *0,1% objemu* zachyceného vzduchu.



Obr. 6-17 Možnosti nastavení bloku hydraulické kapaliny

[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]

Vstupní parametry:

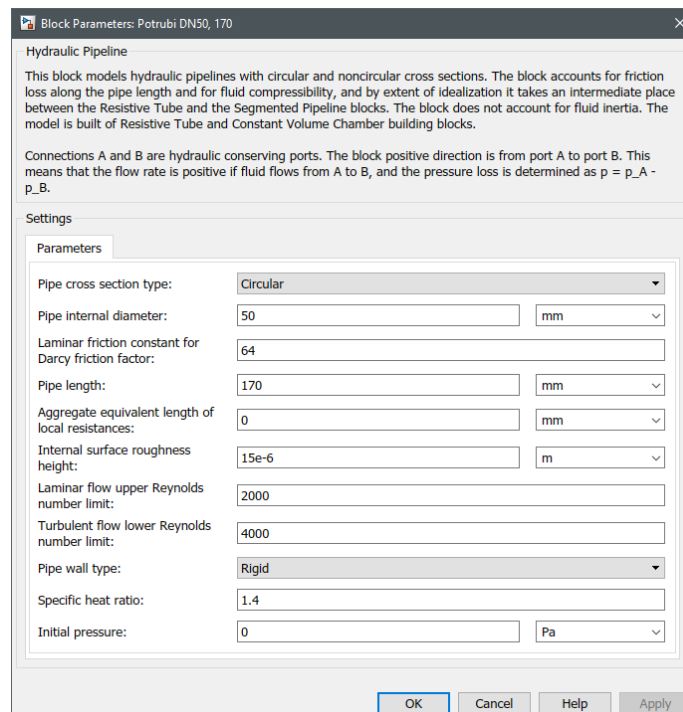
Potrubí je definováno jako válcové těleso s danou světlostí a délkou.

- *Vnitřní světlost potrubí:* $D_{p1} = 50mm; D_{p2} = 80mm$
- *Délka potrubí:*
 $L_{p11} = 170mm; L_{p12} = 775mm; L_{p13} = 210mm$
 $L_{p13} = 290mm; L_{p14} = 895mm; L_{p15} = 205mm$
 $L_{p16} = 205mm; L_{p17} = 775mm; L_{p18} = 190mm;$
 $L_{p19} = 470mm; L_{p120} = 710mm;$
 $L_{p21} = 195mm; L_{p22} = 860mm; L_{p23} = 265mm;$
 $L_{p24} = 205mm; L_{p25} = 155mm;$

Simulační blok potrubí definuje také fyzikální chování média – konkrétně tření tekutiny

- *Darcyho zákon* je matematický vztah, který definuje rychlost průtoku tekutiny nasycenou zónou pevného porézního tělesa. Je to empirický zjištěný vztah a hlavní roly hraje kritická hodnota Reynoldsova čísla Re . Uvádí se hodnota 64.
- *Reynoldsovo číslo* činí 2330 (uvádí se 2000), v modelu potrubí je tato hodnota prezentována jako dolní limit 2000 a horní limit 4000.
- Průměrná *aritmetická úchylka textury povrchu* vnitřní stěny potrubí je $15\mu\text{m}$.

Vložení dat do simulačního bloku:



Obr. 6-18 Možnosti nastavení bloku hydraulického potrubí
 [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]

Tvarová součást – T-kus DN 50:



Obr. 5-11 Tvarová součást T-kus DN50
[Zdroj: 25]



Obr. 6-19 Blok tvarové součásti – T-spojka
v prostředí Simulink
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]

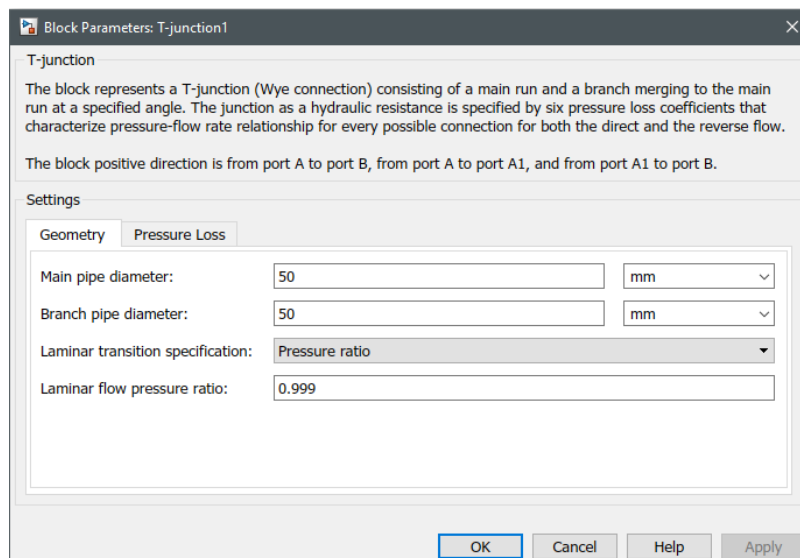
Napájecí porty s jinými bloky:

- *A* – Připojení hrdla *A* – Napojení na potrubí pulzační větve
- *A1* – Připojení hrdla *A1* – Napojení na potrubí vedoucí od výtlaku čerpadla
- *B* – Připojení hrdla *B* – Napojení potrubí vedoucí k nádrži
- Konvence zapojení hydraulických komponent káže, že kladný směr působení je od portu *A* ku portu *B*, dále od portu *A* ku portu *A1* a od portu *A1* ku portu *B*

Vstupní parametry:

- Zapojení s potrubím si vyžaduje podmínku stejného doléhacího průměru jak hlavního, tak i vedlejšího potrubí, což je v obou případech průměr potrubí DN50
- *Vnitřní světlost T-kusu:* $D_{Tm} = 50\text{mm}; D_{Tb} = 50\text{mm}$
- K tématu změn tlaků při vytváření nového toku zléváním 2 větev ve tvarové součásti T-typu nejsou bližší informace a odhadování by bylo obtížné, proto jsou ponechány původní hodnoty

Vložení dat do simulačního bloku:



Obr. 6-20 Možnosti nastavení bloku T-spojky
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]

Tvarová součást – koleno 90° DN50 a DN80:



Obr. 5-13 Tvarová součást – koleno 90°
[Zdroj: 27]



Obr. 6-21 Blok tvarové součásti – koleno 90°
v prostředí Simulink
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]

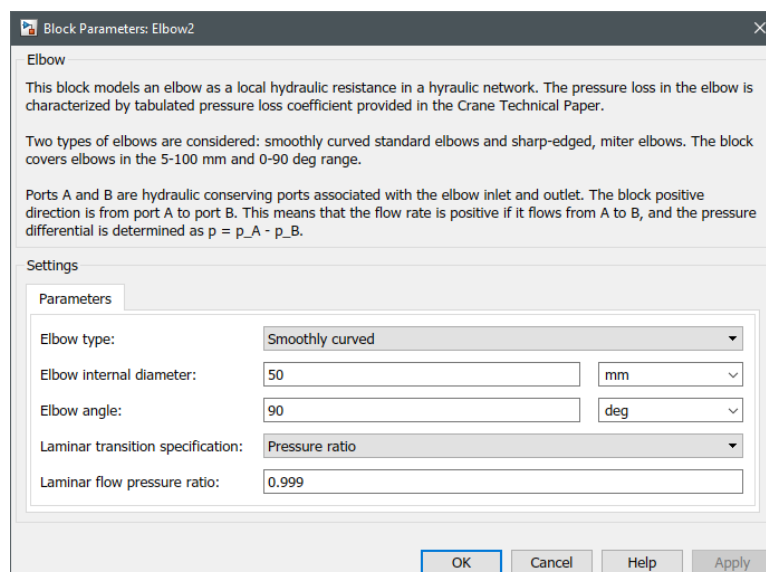
Napájecí porty s jinými bloky:

- A – Připojení hrdla A – Vstupní otvor do tvarové součásti
- B – Připojení hrdla B – Výstupní otvor z tvarové součásti
- Konvence zapojení hydraulických komponent káže, že kladný směr působení je od portu A ku portu B.

Vstupní parametry:

- Zapojení s potrubím si vyžaduje podmínku stejného doléhacího průměru hlavního i vedlejšího potrubí, což je průměr potrubí DN50 a DN80
- Z návrhového schématu je patrné, že koleno spájající potrubí obvodu s potrubím vedoucím k nádrži svírá úhel 90°
- Vnitřní světlost kolena – $D_{k1} = 50\text{mm}; D_{k2} = 80\text{mm}$
- Zahnutí kolena – $\alpha_{k1} = 90^\circ; \alpha_{k2} = 90^\circ;$

Vložení dat do simulačního bloku:



Obr. 6-22 Možnosti nastavení bloku koleno
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]

Škrťící ventily klapkové DN50 a DN80:



*Obr. 5-15 Dvojité excentrický klapkový ventil
DN50 A21WCB
[Zdroj: 29]*

*Obr. 6-23 Blok škrťícího ventilu – klapkový
ventil v prostředí Simulink
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]*

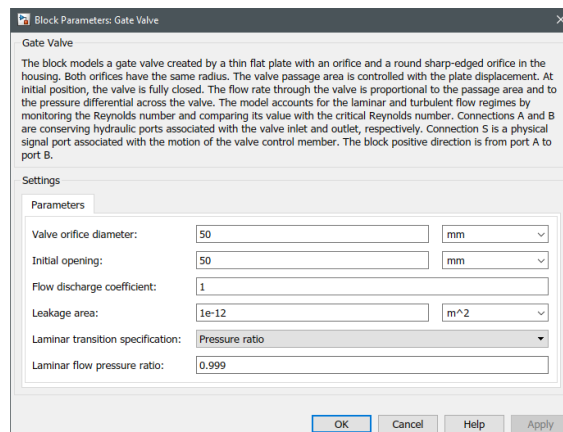
Napájecí porty s jinými bloky:

- *A – Připojení vstupu ventilu –* Vstupní otvor před škrťícím ventilem
- *B – Připojení výstupu ventilu –* Výstupní otvor před škrťícím ventilem
- *S – Spouštění kontrolního členu –* Kontrola pohybového členu ovládání škrťícího ventilu
- Konvence zapojení hydraulických komponent káže, že kladný směr působení je od portu *A* ku portu *B*.

Vstupní parametry:

- Zapojení s potrubím si vyžaduje podmínku stejného doléhacího průměru hlavního i vedlejšího potrubí, což je průměr potrubí DN50 a DN80
- *Vnitřní světlost škrťícího ventilu –* $D_{v1} = 50mm; D_{v2} = 80mm$
- Také u plně otevřených ventilů vznikají turbulentní proudění (které dobře slouží jako ochrana proti kavitaci) a parametry ovlivňující tuhle skutečnost jsou ponechány původní.

Vložení dat do simulačního bloku:

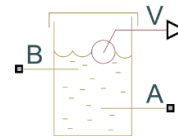


Obr. 6-24 Možnosti nastavení bloku škrtícího ventilu – klapkový ventil
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]

Nádrž:



Obr. 5-16 Nádrž na vodu 1000 l (ilustrační foto)
[Zdroj: 30]



Obr. 6-25 Blok nádrže v prostředí Simulink
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]

Napájecí porty s jinými bloky:

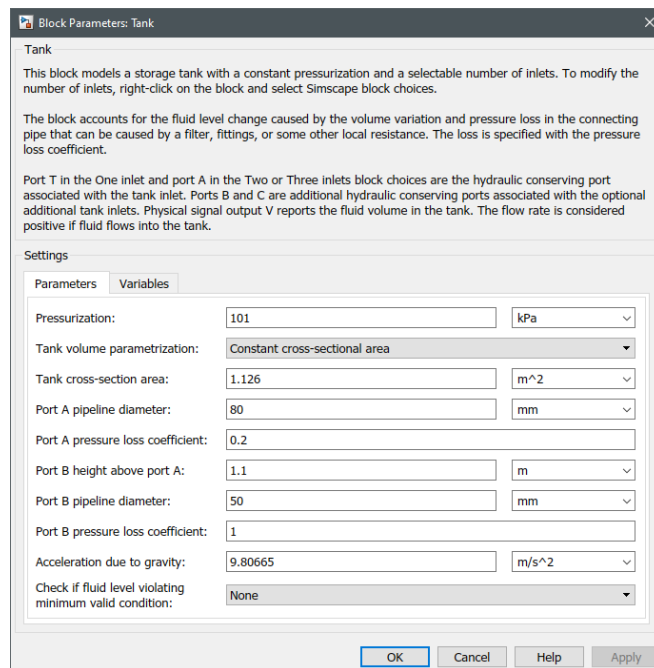
- *A – Připojení hrdlu A* – Otvor v nádrži v nižší poloze vůči dnu reprezentující otvor napojení na potrubí vedoucí k sání
- *B – Připojení hrdlu B* – Otvor v nádrži ve vyšší poloze vůči dnu reprezentující otvor napojení na potrubí vedoucí od výtlaku čerpadla (obvodu)
- *V – Port pro měření objemu* – Fyzikální port zaznamenávající objem tekutiny v nádrži

Vstupní parametry:

Nádrž je definovaná průměrem podstavy a výškou. Uvažujeme vzdálenost obou otvorů od země (dna nádrže) a průměry těchto otvorů pro potrubí DN50 a DN80. Ztrátový koeficient dosahuje hodnoty $x_A = 0,001$ z důvodu simulace vodné hladiny, ze které je odebírána tekutina volně a beze ztrát. Na druhou stranu ztrátový koeficient $x_B = 1$ simuluje rozptyl tlaku přicházejícího z potrubí do prostoru v nádrži a na její vnitřní stěny. Dále je určen tlak uvnitř nádrže. Ten dosahuje hodnot běžného atmosférického tlaku, který ve všeobecnosti činí 101 kPa (cca 1 bar).

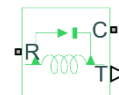
- Obsah podstavy nádrže – $S_n = 1,126\text{m}^2$
- Vnitřní světlost otvoru hrdla v nádrži – $D_{n1} = 50\text{mm}; D_{n2} = 80\text{mm}$
- Rozdíl vzájemné výšky otvorů nad úrovní dna nádrže – $\Delta h = 1,1\text{m}$
- Úroveň stlačení – $p_n = 101\text{kPa}$
- Gravitační zrychlení – $g = 9,80665\text{ m/s}^2$
- Koeficienty ztráty tlaku u otvoru A a B – $x_A = 0,001; x_B = 1$

Vložení dat do simulačního bloku:



*Obr. 6-26 Možnosti nastavení nádrže
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]*

Tenzometrická hřídel KTR, DATAFLEX 22/20:



*Obr. 5-17 Obr. Tenzometrická hřídel KTR
DATAFLEX 22/20
[Zdroj: 31]*

*Obr. 6-27 Blok ideálního senzoru kroutivého
momentu v prostředí Simulink
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]*

Napájecí porty s jinými bloky:

- *R* – Vstupní mechanická reference senzoru – Zapojení rotující části výstupní hřídele elektromotoru
- *C* – Výstupní mechanická reference senzoru – Zapojení části senzoru k mechanické referenci základního tělesa
- *T* – Port pro výsledek měření momentu – Výstup záznamu momentu ve formě signálu
- Konvence zapojení mechanických komponent káže, že kladný směr působení je od portu *T* ku portu *C*.

Související bloky:

- *Snímač ideálního rotačního pohybu* – Zapojení rotujících částí *R* a *C* je obdobné jako u předchozího senzoru momentu, zbylé porty pro měření jsou:



- *W* – Port pro výsledek měření úhlové rychlosti – Výstup záznamu úhlové rychlosti ve formě signálu
- *A* – Port pro výsledek měření úhlového vychýlení – Výstup záznamu úhlového vychýlení ve formě signálu

6-28 Blok ideálního snímače rotačního pohybu v prostředí Simulink
 [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]

Snímač tlaku DMP 331:



Obr. 5-19 Snímač tlaku DMP 331
 [Zdroj: 32]



Obr. 6-29 Blok ideálního snímače tlaku v prostředí Simulink
 [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]

Napájecí porty s jinými bloky:

- *A* – Vstupní otvor snímače tlaku – Napojení snímače tlaku na hydraulický okruh
- *B* – Výstupní otvor snímače tlaku – Napojení snímače na hydraulickou referenci pro měření absolutního tlaku.
- *P* – Port pro výsledek měření tlaku – Výstup záznamu tlaku ve formě signálu
- Konvence zapojení hydraulických komponent káže, že kladný směr působení je od portu *A* ku portu *B*.

Průtokoměr MQI 99-SN:

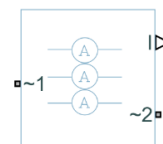


Obr. 5-19 Model průtokoměru MGI 99-SN
[Zdroj: 33]

Obr. 6-30 Blok ideálního snímače průtoku
v prostředí Simulink
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]

Napájecí porty s jinými bloky:

- *A* – Připojení snímače průtoku *A* – Vstupní otvor snímače průtoku pro potrubí hydraulického okruhu
- *B* – Připojení snímače průtoku *B* – Výstupní otvor snímače průtoku pro potrubí hydraulického okruhu
- *Q* – Port pro výsledek měření objemového průtoku – Napojení snímače průtoku na měření objemového průtoku
- *M* – Port pro výsledek měření hmotnostního průtoku – Napojení snímače průtoku na měření hmotnostního průtoku
- Konvence zapojení hydraulických komponent káže, že kladný směr působení je od portu *A* ku portu *B*.
- Klešťový ampérmetr 1146 Agilent:



Obr. 5-22 Klešťový ampérmetr 1146 Agilent
[Zdroj: 34]

Obr. 6-31 Blok ideálního snímače proudu
v prostředí Simulink
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]

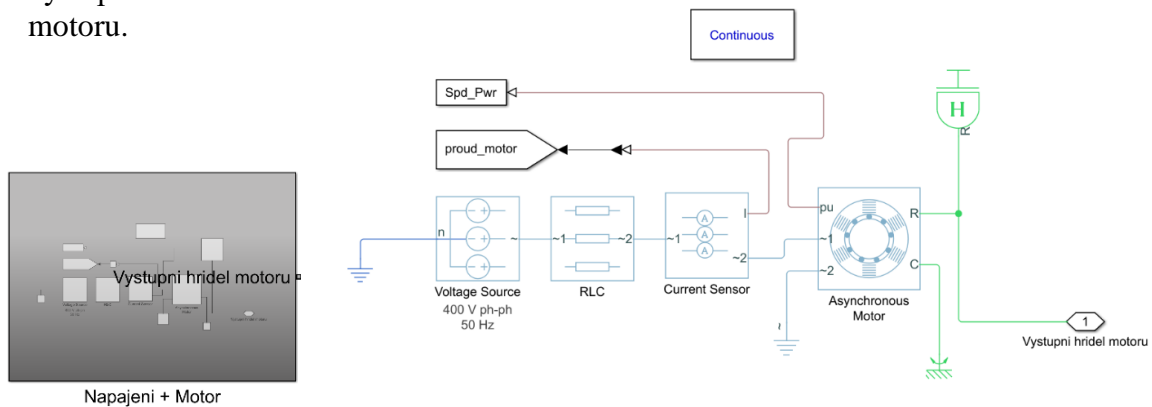
Napájecí porty s jinými bloky:

- *1* – Elektrické zapojení *1* – Připojení snímače na zapojení obvodu do sítě se střídavým napětím
- *2* – Elektrické zapojení *2* – Připojení snímače na zapojení obvodu vedoucího do asynchronního motoru
- *I* – Port pro výsledek měření proudů v obvodu – Výstupní port snímače proudu na měření proudu na jednotlivých fázích

6.3 Tvorba matematicko-fyzikálního modelu – Tvorba subsystémů

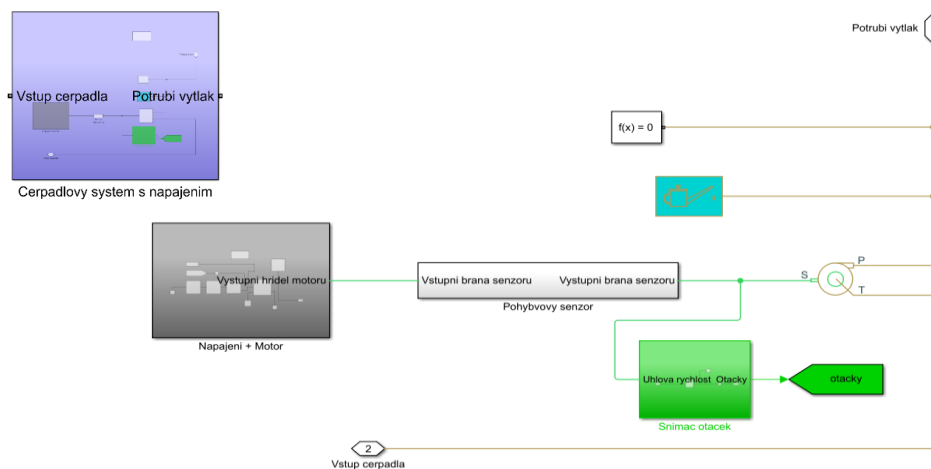
Subsystémy mají podobný význam jako složky pro skupinu souborů – dokážou seskupit několik prvků simulace do jednoho bloku s potřebným počtem portů odvíjejícího se od jeho obsahu. Používají se hlavně z důvodu ucelení podsystémů do vhodného prvku, který je pro popis celého systému nezbytný. V tomto případě se jedná o uskupení do subsystémů podle funkčního určení oblastí hydraulického okruhu.

- *Subsystém Napájení + Motor* – Zapojení elektromotoru na síť střídavého napětí s měřením proudu. Výstupem tohoto subsystému jsou průběhy proudů měřených na jednotlivých fázích, charakteristiky rychlosti a průběhu elektromotoru a mechanický port výstupního hřídele motoru.



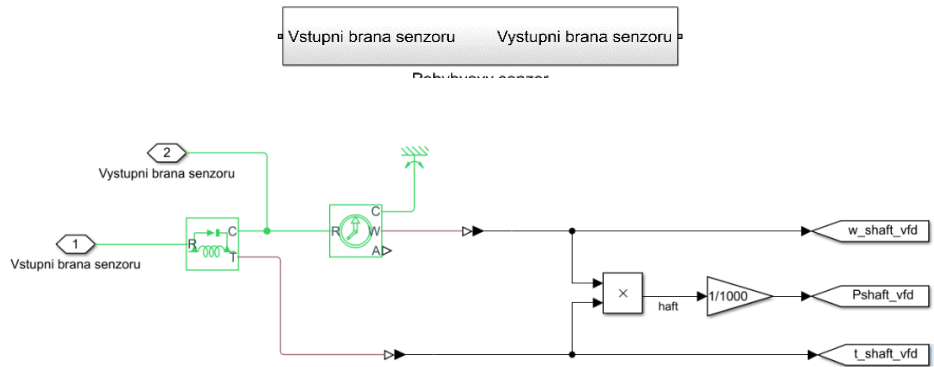
Obr. 6-32 Zobrazení a) bloku *Subsystém Napájení + Motor* v prostředí Simulink b) obsahu bloku *Subsystém Napájení + Motor*
 [Zdroj: Prostedí Simulink MATLAB R2020b]

- *Subsystém čerpadlový systém s napájením* – Zapojení mechanické části čerpadla na výstupní hřídel elektromotoru se senzorem kroutícího momentu a senzorem otáček. Čerpadlový výstup je výstupem pro napojení sacího potrubí, napájecí pro napojení výtlačného potrubí. Na výstup výtlačného potrubí je připojení hydraulického média a simulační blok řešení matematicko-fyzikálních výpočtů.



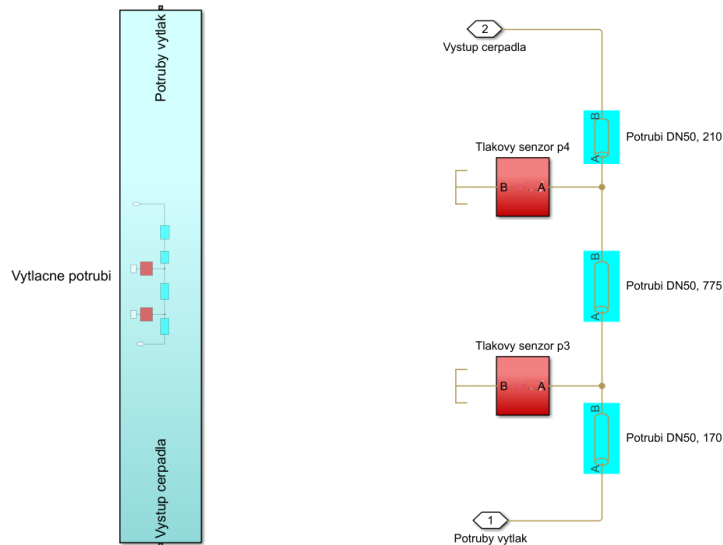
Obr. 6-33 Zobrazení a) bloku *Subsystém Čerpadlový systém s napájením* v prostředí Simulink b) obsahu bloku *Subsystém Čerpadlový systém s napájením*
 [Zdroj: Prostedí Simulink MATLAB R2020b]

- *Subsystem Pohybový senzor* – Zapojení senzoru otáček i momentu přímo na mechanickou část čerpadla, tedy vstup a výstup mají stejný charakter.



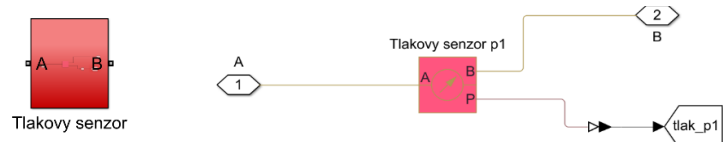
Obr. 6-34 Zobrazení a) bloku *Subsystem Pohybový senzor* v prostředí Simulink b) obsahu bloku *Subsystem Pohybový senzor*

- *Subsystem Výtlačné potrubí* – Vstup do subsystému vede médium z výtlačku čerpadla, napájí se na soustavu 3 potrubí o daných rozměrech s výstupem reprezentujícím výtlaček čerpadla. Na okruhu jsou napojeny 2 tlakové senzory snímající absolutní tlak v obvodu.



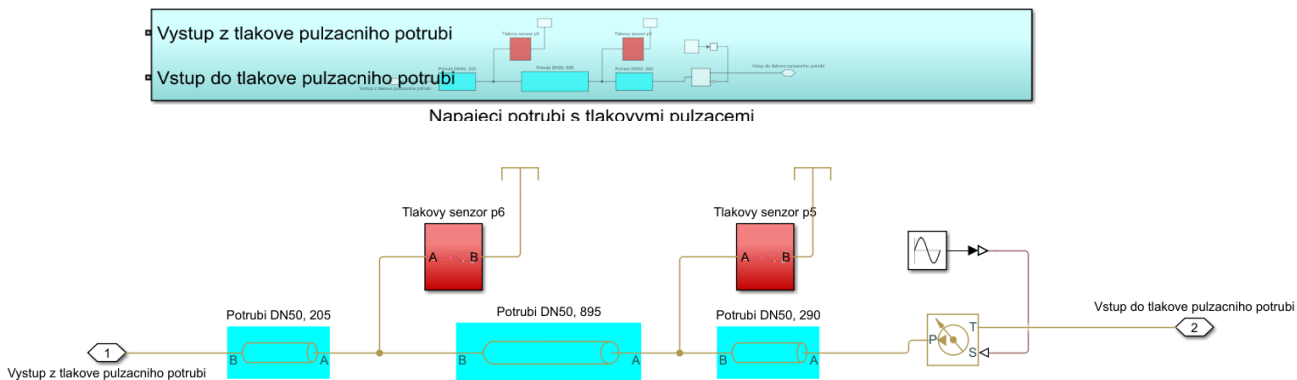
Obr. 6-35 Zobrazení a) bloku *Subsystem Pohybový senzor* v prostředí Simulink b) obsahu bloku *Subsystem Pohybový senzor*
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]

- *Subsystem Tlakový senzor* – Zapojení tlakového senzoru A vede z obvodu, zatímco zapojení senzoru B vede na hydraulickou referenci, což zajišťuje měření absolutního tlaku. Ze senzoru vede snímaný signál absolutního tlaku.



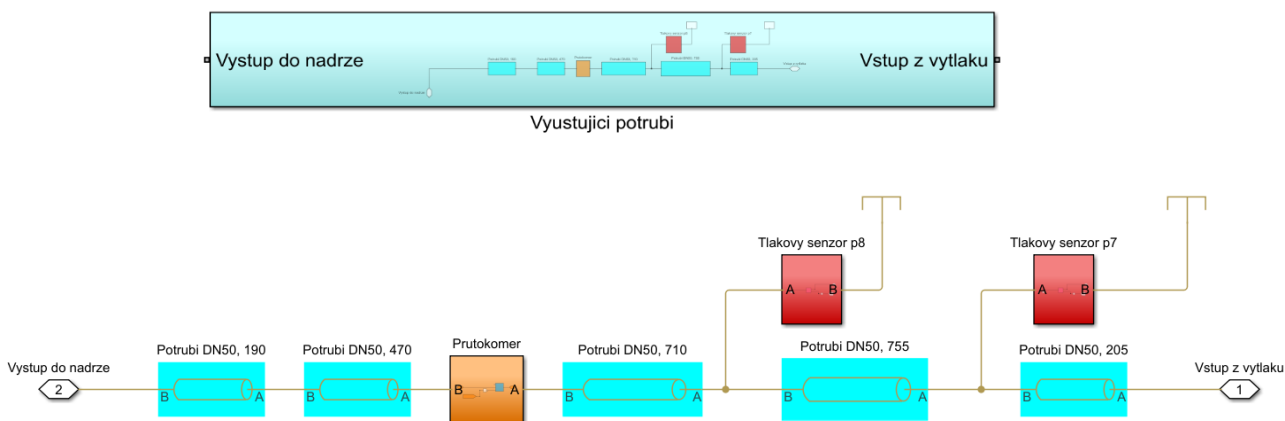
Obr. 6-36 Zobrazení a) bloku *Subsystem Tlakový senzor* v prostředí Simulink b) obsahu bloku *Subsystem Tlakový senzor*
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]

- *Subsystém Napájecí potrubí s tlakovými pulzacemi* – Vstup i výstup subsystému vede přes potrubí, které pak simulačně spojíme do jednoho spojení vedoucího k jednomu z hlavních připojení hrdla T-kusu. Soustava potrubí se skládá ze 3 potrubí daných rozměrů, 2 tlakových senzorů snímajících absolutní tlak této větve. Na pomyslném konci se nachází simulace tlakového pulsátoru, u kterého předpokládáme ideální zdroj tlaku s ideálním sinusovým průběhem.



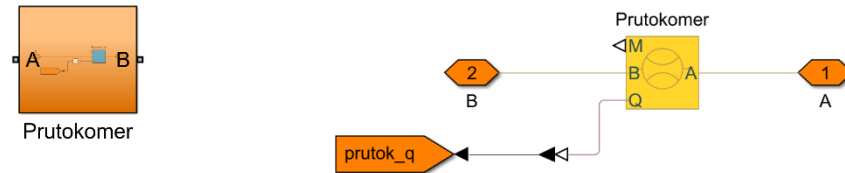
Obr. 6-37 Zobrazení a) bloku *Subsystém Napájecí potrubí s tlakovými pulzacemi* v prostředí Simulink b) obsahu bloku *Subsystém Napájecí potrubí s tlakovými pulzacemi*
 [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]

- *Subsystém Vyústující potrubí* – Vstupní médium vede z výstupního hlavního hrdla T-kusu do výstupu k vedoucímu k vrchnímu otvoru nádrže. Médium proudí skrze soustavu 5 potrubí dané velikosti, v jejichž dráze je umístěn průtokoměr. Na hydraulický obvod jsou napojeny 2 tlakové senzory.



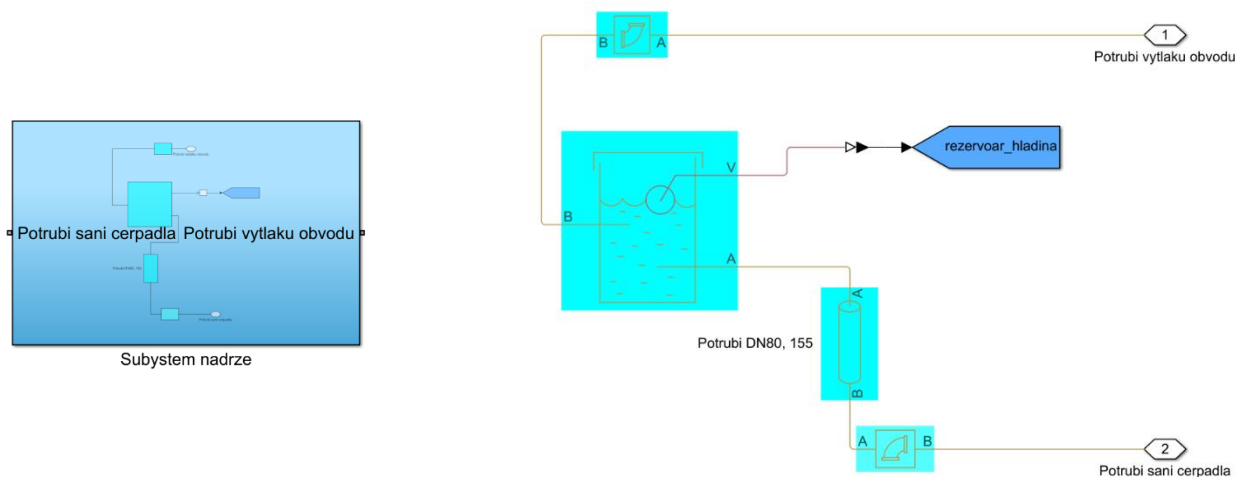
Obr. 6-38 Zobrazení a) bloku *Subsystém Vyústující potrubí* v prostředí Simulink b) obsahu bloku *Subsystém Vyústující potrubí*
 [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]

- *Subsystem Průtokoměr* – Zapojení senzoru průtoku přímo do větve obvodu ve směru proudění. Z průtokoměru je zaznamenávána signál objemového průtoku.



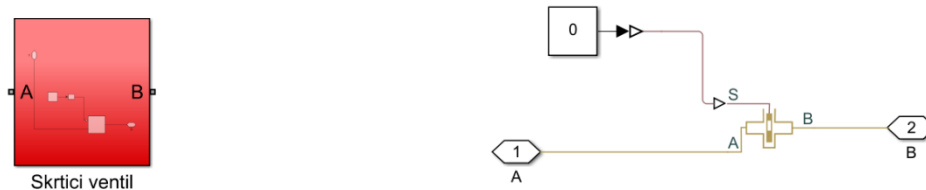
Obr. 6-39 Zobrazení a) bloku *Subsystem Vyušující potrubí* v prostředí Simulink b) obsahu bloku *Subsystem Vyušující potrubí*
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]

- *Subsystem Nádrže* – Do subsystému vede médium skrze tvarovou součást – koleno 90° ústící v nádrži s hydraulickým médiem, kde se vlivem disperze do atmosféry zmenší tlak na hodnotu atmosférického tlaku. Z nádrže vede médium potrubím a tvarovou součástí – koleno 90° daných rozměrů na připojení ku potrubí vedoucímu k čerpadlu.



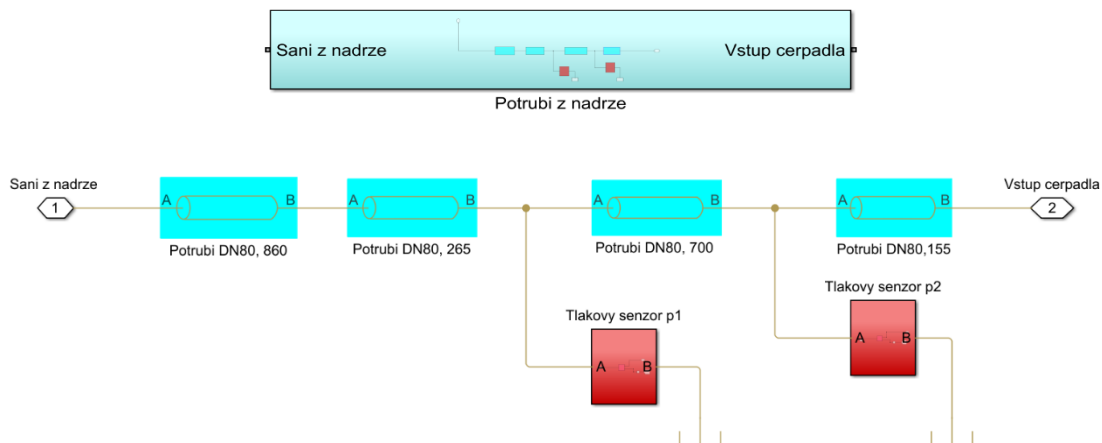
Obr. 6-40 Zobrazení a) bloku *Subsystem nádrže* v prostředí Simulink b) obsahu bloku *Subsystem nádrže*
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]

- *Subsystem Škrťící ventil* – Škrťící ventil je jak před vstupem, tak za výstupem subsystému nádrže. Ventily mají stejnou velikost jako potrubí, jsou připojeny přímo v oběžném systému ve směru proudění média a jsou plně otevřeny.



Obr. 6-41 Zobrazení a) bloku *Subsystem Škrťící ventil* v prostředí Simulink b) obsahu bloku *Subsystem Škrťící ventil*
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]

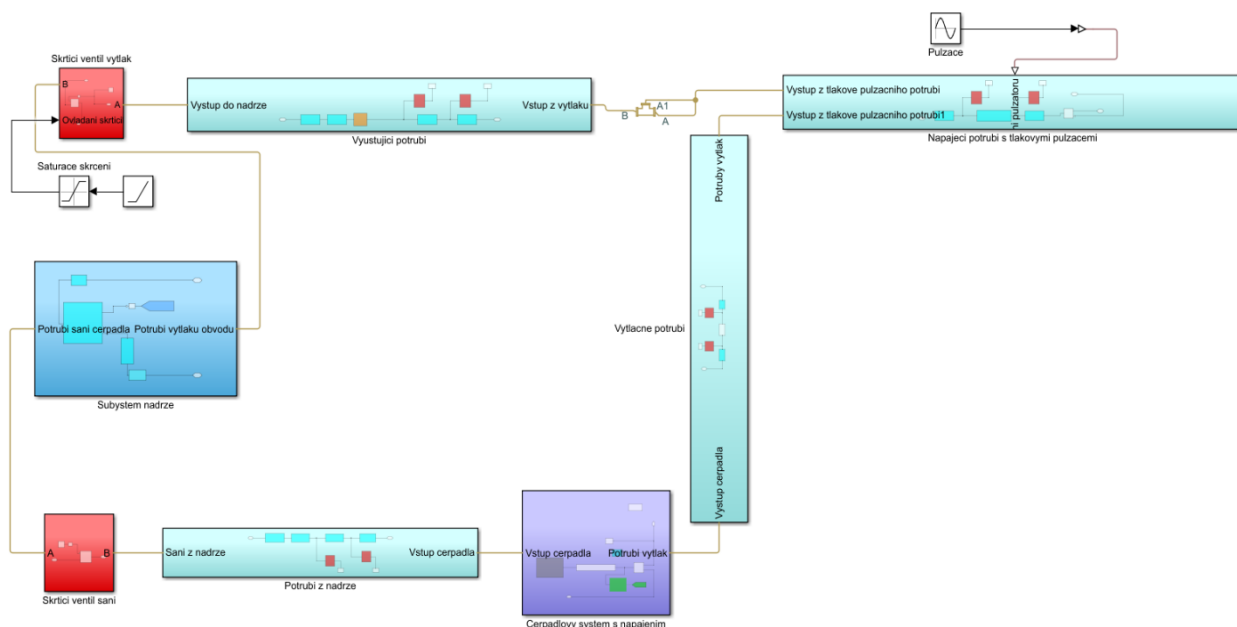
- *Subsystem Potrubí z nádrže* – Vstup do subsystemu vede od nádrže skrze škrtkící ventil na soustavu 4 potrubí daných rozměrů a výstup vede přímo na port vstupu do čerpadla reprezentující sání čerpadla. Na hydraulický obvod jsou přivedeny 2 tlakové senzory.



Obr. 6-42 Zobrazení a) bloku *Subsystem Potrubí z nádrže* v prostředí Simulink b) obsahu bloku *Subsystem Potrubí z nádrže*
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]

6.4 Tvorba matematicko-fyzikálního modelu – Zapojení celého systému

Celý diagnostický systém je zapojení množin prvků, které jsou popsány a převedeny do simulačních bloků. Tyto bloky jsou reprezentovány jako subsystemy, kde jsou seskupeny prvky podobné funkcionality. Právě následující práce s diagnostickým modelem je možná až po zapojení potřebných vstupních a výstupních portů pro logickou správnost pro simulaci výpočtů.



Obr. 6-43 Zapojení celého simulačního systému hydraulického obvodu
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]

7 POPSÁNÍ SHODY SYSTÉMU S DIAGNOSTICKÝM MODELEM

7.1 Prováděný experiment – Statická část

Průběh experimentu je následující – asynchronní motor napojený na síť napětí se rozběhne a působením odebírání elektrické energie jako příkonu a proměnou na elektromechanický výkon se výstupní hřídel roztočí, a tím roztočí i odstředivé čerpadlo. Toto čerpadlo napojené na potrubní systém hydraulického obvodu sání a výtlačku vykonává práci tak, že odevzdává mechanickou energii z lopatek oběžného kola čerpadla hydraulickému médiu (v našem případě destilované vodě). Médium je vháněno do potrubního systému hydraulického obvodu a prochází skrze tvarové součásti, průtokoměr a škrťací ventily z jednoho otvoru nádrže reprezentující sací potrubí do otvoru druhého nádrže reprezentující otvor pro potrubí výtlačné.

Větev, na které je zapojen hydraulický píst není v provozu a nevyvolává tlakové pulzace. Tato větev tedy nepřispívá žádným novým přírůstkem tlaku nebo průtoku. Naměřené veličiny statické části experimentu slouží k posouzení první shody diagnostického modelu se systémem.

Měření je zaměřeno na 2 skupiny veličin, a to:

- *motorové* – snímání *elektrických* a *mechanických* veličin motoru – efektivní hodnotu fázových proudů I_{1rms} , I_{2rms} a I_{3rms} , efektivní hodnotu fázových napětí U_{1rms} , U_{2rms} U_{3rms} , moment na výstupní hřídeli elektromotoru, příkon elektromotoru, mechanické otáčky a mechanický výkon motoru
- *obvodové* – snímání *hydraulických* veličin obvodu – hodnotu absolutního tlaku v potrubí před čerpadlem p_1 a p_2 , hodnotu absolutního tlaku ve výtlačném potrubí čerpadlem p_3 a p_4 , hodnotu absolutního tlaku v pulzačním potrubí p_5 a p_6 , hodnotu absolutního tlaku v potrubí před nádrží p_7 a p_8 a sekundový průtok Q ve stejném potrubí.

Rozdělení měřených veličin pomáhá pochopit princip nepřímé diagnostiky – dokázat, že tlakové pulzace přiváděné do *obvodu* způsobují změnu na straně *motoru* zapojeného do čerpadla. Proces proměny těchto charakteristik bude popsán v použité diagnostické metodě. Měření obsahuje 14 záznamů charakteristik těchto zmíněných veličin. Jedná se o rozběh motoru a čerpadla z klidové pozice na maximální výkon, což činí výstupní moment hřídele elektromotoru $15,07Nm$, příkon na straně elektrické sítě $2735,79W$, otáčky čerpadla $1440,45ot. min^{-1}$, mechanický výkon čerpadla $2273,53W$ a tato skutečnost vyvolává v měřené části obvodu objemový průtok $13,04l. s^{-1}$.

Tabulka 6 Charakteristiky experimentálně naměřených dat I

	I_{1rms}	I_{2rms}	I_{3rms}	U_{ll1rms}	U_{ll2rms}	U_{ll3rms}	Moment M_e	Příkon P_e	Otacky ω	Mechanicky vykon P_m	Průtok Q
	A	A	A	V	V	V	Nm	W	rpm	W	l/m
1	3.84	4.03	4.02	405.02	407.05	407.05	5.81	1201.54	1477.40	898.59	0.02
2	3.87	4.06	4.05	403.88	406.09	406.09	6.34	1285.46	1475.29	979.21	0.97
3	3.96	4.15	4.12	404.26	406.13	406.13	7.02	1395.41	1472.13	1082.28	1.97
4	4.03	4.23	4.21	403.46	405.63	405.63	7.77	1516.59	1469.88	1196.00	2.99
5	4.13	4.33	4.31	403.22	405.41	405.41	8.52	1638.74	1466.75	1308.97	3.94
6	4.28	4.46	4.43	403.45	405.43	405.43	9.42	1787.73	1463.25	1444.08	5.08
7	4.40	4.58	4.55	403.94	405.85	405.85	10.15	1909.43	1460.34	1552.78	5.99
8	4.53	4.71	4.69	403.56	405.66	405.66	11.01	2052.60	1457.19	1680.75	7.08
9	4.65	4.85	4.82	404.07	406.38	406.38	11.75	2175.63	1455.30	1791.14	8.00
10	4.76	4.99	4.96	403.86	406.44	406.44	12.49	2299.54	1451.56	1899.09	9.06
11	4.91	5.12	5.07	403.14	405.35	405.35	13.25	2425.33	1448.37	2009.52	10.10
12	5.02	5.24	5.18	403.18	405.46	405.46	13.84	2525.79	1445.47	2095.39	11.00
13	5.17	5.35	5.31	403.21	405.20	405.20	14.49	2635.99	1442.87	2189.10	12.06
14	5.28	5.48	5.43	403.43	405.55	405.55	15.07	2735.79	1440.45	2273.53	13.04

Rozběh čerpadla vyvolá pohyb hydraulického média v jednotlivých větvích hydraulického obvodu. Spolu s měřením objemového průtoku v potrubí před nádrží jsou snímány absolutní tlaky jednotlivých částí hydraulického obvodu a vytvořeny charakteristiky se stejnými složkami jak pro motor, tak pro hydraulický obvod.

Tabulka 7 Charakteristiky experimentálně naměřených dat II

	Průtok Q	Tlak p_1	Tlak p_2	Tlak p_3	Tlak p_4	Tlak p_5	Tlak p_6	Tlak p_7	Tlak p_8
	l/m	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
1	0.02	109.0	108.7	255.4	248.0	245.2	245.4	245.0	245.5
2	0.97	108.7	108.3	255.8	248.3	245.5	245.8	245.3	245.6
3	1.97	108.5	108.1	256.4	248.7	246.1	246.4	245.2	245.5
4	2.99	108.2	107.8	256.5	248.6	246.1	246.4	244.3	244.4
5	3.94	107.8	107.4	255.7	247.4	245.1	245.4	242.0	241.9
6	5.08	107.0	106.6	253.2	244.5	242.4	242.7	237.2	237.0
7	5.99	106.4	105.9	250.5	241.3	239.5	239.9	232.4	231.9
8	7.08	105.4	104.9	246.4	236.6	235.5	235.8	225.6	224.7
9	8.00	104.6	104.1	242.3	231.9	232.5	232.9	220.3	219.1
10	9.06	103.1	102.6	235.4	224.1	224.4	224.7	208.4	206.8
11	10.10	102.0	101.5	228.2	215.7	216.5	216.9	197.2	194.9
12	11.00	100.5	100.0	220.3	206.9	210.6	211.1	188.4	186.0
13	12.06	98.8	98.3	210.3	196.0	197.7	197.9	169.5	166.8
14	13.04	96.9	96.4	199.8	184.2	187.4	187.7	154.6	151.2

Pro uvádění shody experimentálního systému se simulovaným bylo rozhodnuto, že pozorování a zaznamenávání veličin bude vůči dosaženému průtoku Q . Jedná se o tyto veličiny:

- *Hydraulický výtlač čerpadla* p_3 [kPa] – tlak v potrubí za čerpadlem
- *Hydraulický výkon* P_h [W] – výkon odevzdaný z čerpadla do hydraulického systému
- *Příkon* P_e – hodnota výkonu odpovídající odebranému výkonu elektromotorem z napájení elektrické sítě.
- *Proudy* $I_{1rms}, I_{2rms}, I_{3rms}$, – efektivní hodnoty proudů vypočteny podělením hodnot I_1, I_2, I_3 , hodnotou $\sqrt{2}$.

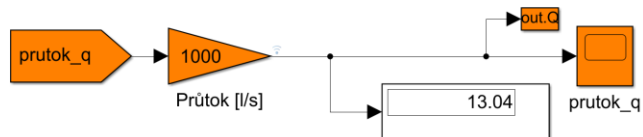
Dále je každý tento průběh zobrazen ve stejném grafu s další charakteristikou, jejíž hodnoty jsou zobrazeny na druhé vedlejší ose vpravo:

- *Měrná energie čerpadla* Y [J/kg] – energie odevzdávaná čerpadlem médiu vztažena na jednotku hmotnosti, vypočtena z tlakové diference před a za čerpadlem.

Tabulka 8 Vypočtené veličiny z experimentálně naměřených hodnot pro popsání shody se simulací

	Průtok Q	Měrná energie čerpadla Y	Výtlač čerpadla p_3	Hydraulický výkon P_h	Elektrický příkon P_e	I_{1rms}	I_{2rms}	I_{3rms}
	l/m	J/kg	kPa	W	W	A	A	A
1	0.02	147.2	255.4	2.4	1201.54	3.84	4.03	4.02
2	0.97	148.0	255.8	143.3	1285.46	3.87	4.06	4.05
3	1.97	148.7	256.4	292.8	1395.41	3.96	4.15	4.12
4	2.99	149.2	256.5	445.1	1516.59	4.03	4.23	4.21
5	3.94	148.7	255.7	583.8	1638.74	4.13	4.33	4.31
6	5.08	147.1	253.2	745.2	1787.73	4.28	4.46	4.43
7	5.99	145.0	250.5	865.7	1909.43	4.40	4.58	4.55
8	7.08	141.9	246.4	1002.1	2052.60	4.53	4.71	4.69
9	8.00	138.6	242.3	1105.5	2175.63	4.65	4.85	4.82
10	9.06	133.2	235.4	1203.2	2299.54	4.76	4.99	4.96
11	10.10	127.0	228.2	1279.8	2425.33	4.91	5.12	5.07
12	11.00	120.6	220.3	1323.4	2525.79	5.02	5.24	5.18
13	12.06	112.4	210.3	1350.7	2635.99	5.17	5.35	5.31
14	13.04	103.7	199.8	1349.0	2735.79	5.28	5.48	5.43

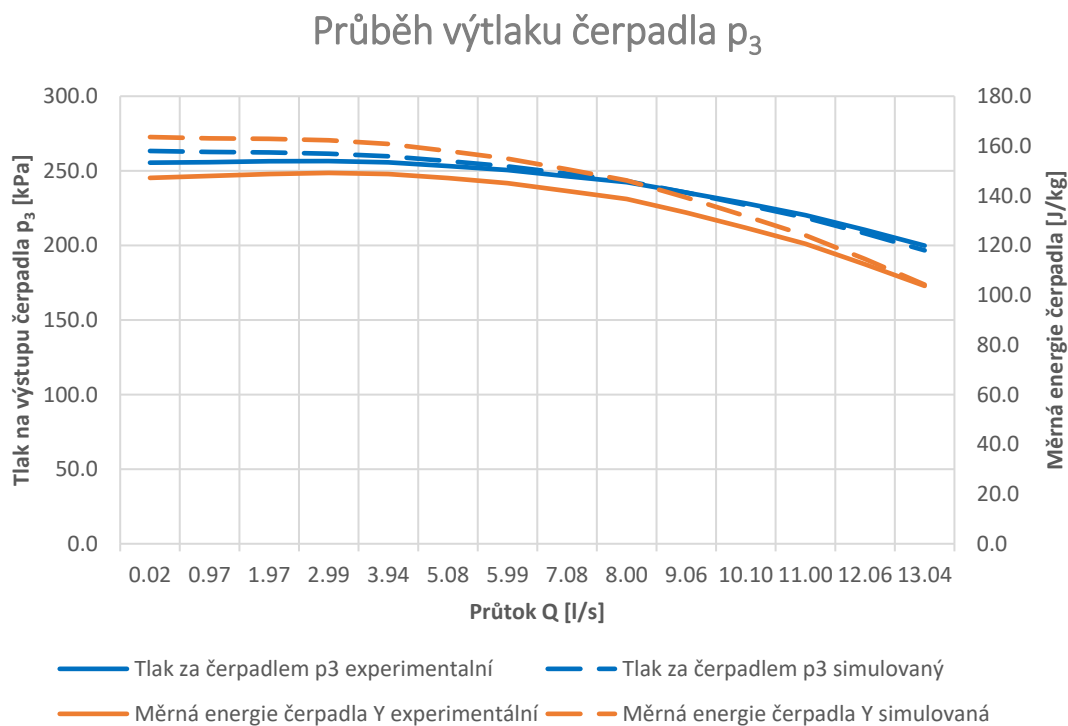
Právě tyto charakteristiky, které sloužili k popisu chování čerpadla a hydraulického systému jsou také generovány ze simulace modelu tohoto obvodu. Jedná se o porovnání reálně dosažených statických charakteristik od nulového až po maximální výkon. Cílem simulování bylo dosažení podobné sady charakteristik složené ze 14 průběhů pokrývající požadovaný pracovní rozsah čerpadla. Způsob, jakým bylo přistupováno k získávání hodnot byl obdobný s reálným experimentem – v ustáleném stavu maximálního výkonu čerpadla se pomocí zavírání škrťcích ventilů dosahovalo různých hodnot průtoku a tím dospění k záznamu ostatních parametrů obvodu. V prostředí Simulink je možnost použití bloku *Scope* nebo pro pouze číselný údaj bloku *Display*.



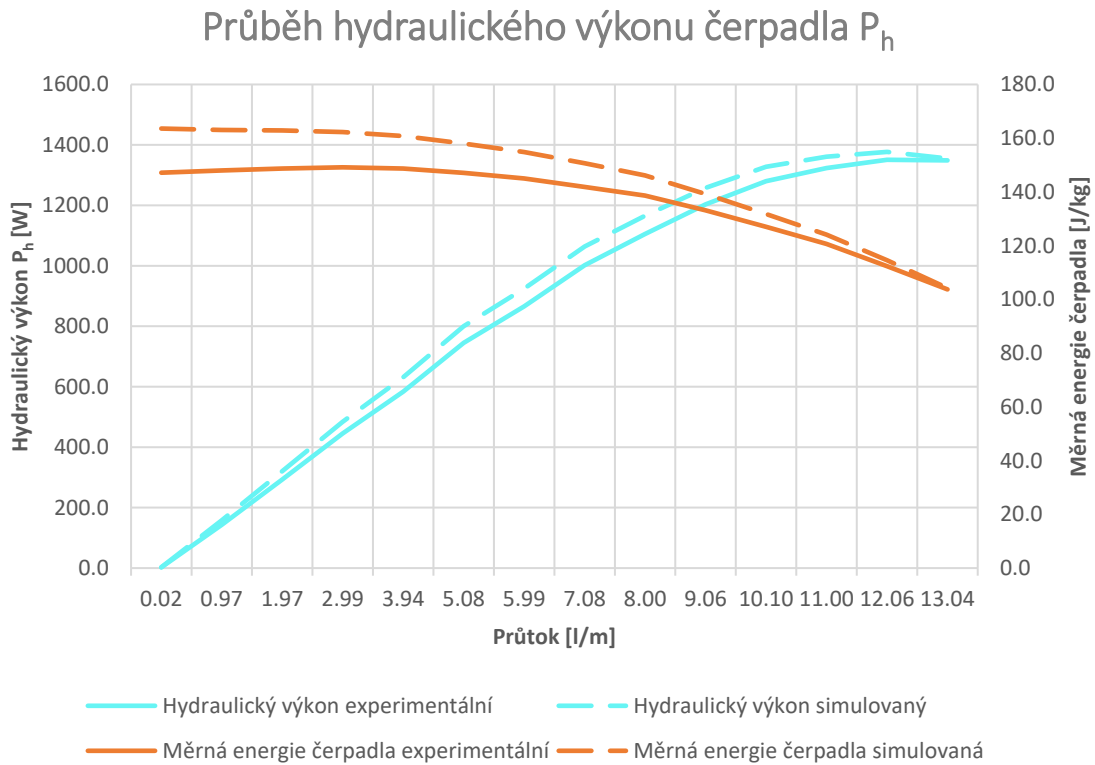
Obr. 7-1 Zobrazení bloku Display na veličině Průtok Q
 [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]

V následující části jsou graficky zobrazeny statické hodnoty měřené při experimentu (zobrazeny plnou čarou) s hodnotami generovanými simulací (zobrazeny přerušovanou čarou).

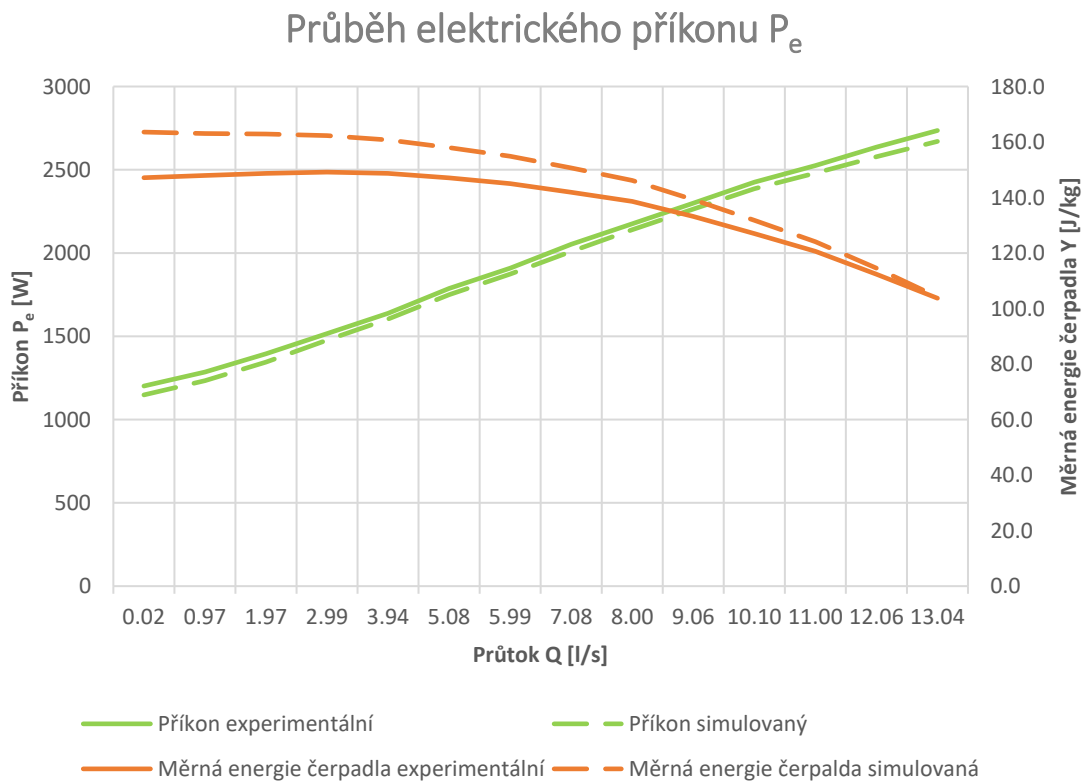
7.2 Srovnání průběhů experimentu a simulace statické části



Obr. 7-2 Graf experimentálního a simulačního průběhu výtlačku čerpadla p_3

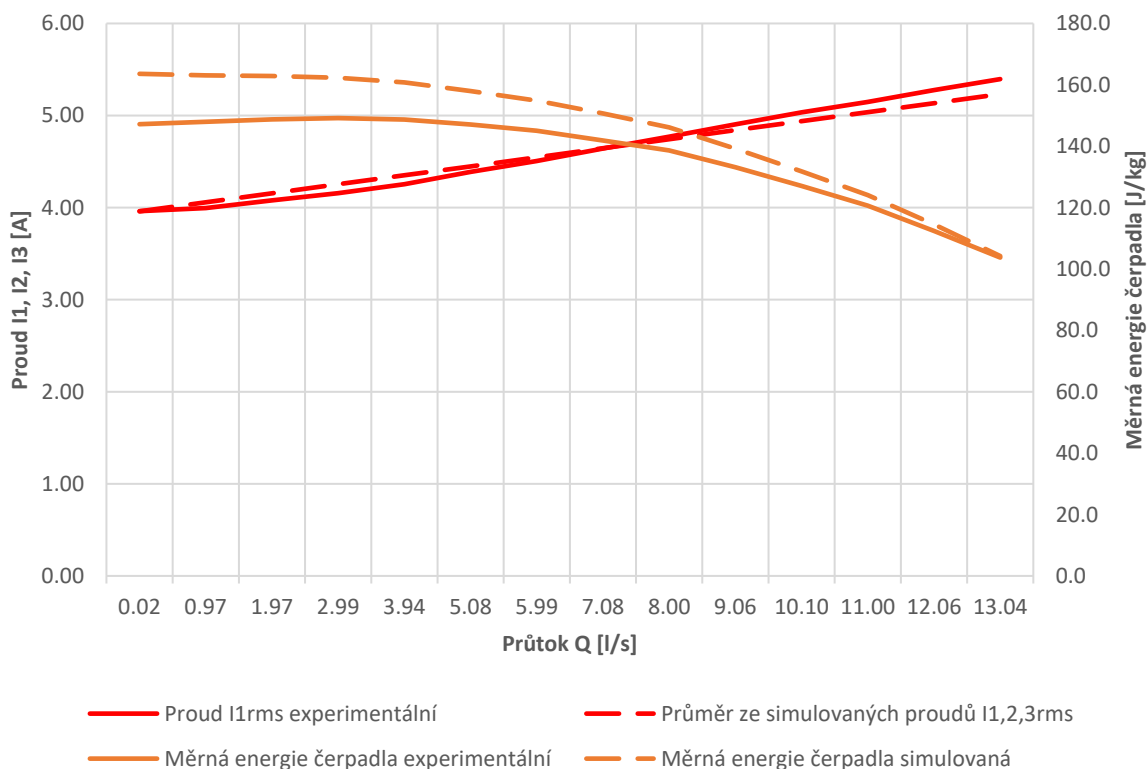


Obr. 7-3 Graf experimentálního a simulovaného hydraulického výkonu čerpadla P_h



Obr. 7-4 Graf experimentálního a simulovaného elektrického příkonu P_e

Průběhy proudů v elektromotoru



Obr. 7-5 Graf experimentálního a simulovaných proudů v elektromotoru

7.3 Použitá diagnostická metoda

Obecná metoda pro diagnostiku tlakových pulzací spočívá v měření tlaku. U některých zařízení však tuto metodu nelze použít z důvodu nemožnosti přístupu k potrubí (například pro nebezpečné kapaliny, radioaktivní prostředí a jiné) nebo nemožnosti změnit konstrukci potrubí. U těchto aplikací je možné použít přístup přes aktuální měření. V úvahu jsou brány následující metody:

- A) Analýza podpisu proudu motoru
- B) Okamžitá analýza podpisu výkonu

U všech těchto metod se používá analýza Fourierovy transformace.

A) Analýza aktuálního podpisu motoru Analýza proudového popisu motoru je jednou ze standardních postupů pro diagnostický indukční stroj, který používá měřený průběhu proudu. Tento typ analýzy slouží k diagnostice poruch vinutí statoru, excentricity, zlomené tyče atd.

$$f_{load} = f_s \pm m \cdot f_r \quad (18)$$

kde

- f_s je napájecí frekvence,
- f_r je rotační frekvence (pro různé zatížení) pro $m = 1, 2, 3 \dots$

B) Okamžitá analýza popisu energie. Tyto analýzy jsou založeny na vyhodnocení okamžité elektrické energie.

$$p = u_{a0}(t) \cdot i_a(t) + u_{b0}(t) \cdot i_b(t) + u_{c0}(t) \cdot i_c(t) \quad (19)$$

kde

- u_{a0}, u_{b0}, u_{c0} je okamžitá hodnota vedení do nuly (fáze),
- i_a, i_b, i_c je okamžitá hodnota fázového proudu.

Pokud není k dispozici napětí mezi vedením a neutrálem, je možné použít fáze-na-fázy napětí pomocí Aronovy metody. Okamžitý výkon lze poté vypočítat podle.

$$p = u_{ac}(t) \cdot i_a(t) + u_{bc}(t) \cdot i_b(t) \quad (20)$$

kde

- u_{ac}, u_{bc} je okamžitá hodnota napětí mezi linkami,
- i_a, i_b je okamžitá hodnota fázového proudu.

Základním problémem této metody je potřeba měření průběhů napětí, což je neobvyklé. Hlavní výhoda této metody spočívá v tom, že frekvence změny točivého momentu se odráží ve frekvenční analýze FFT.

7.4 Prováděný experiment – Dynamická část

Cílem celého experimentu je demonstrac, že tlakové pulzace vyvolané v hydraulickém obvodu mohou být nepřímo pozorovány na průběhu čerpadla a elektromotoru. Tato část experimentu, a tedy i simulace je zaměřena na přivádění tlakových pulzací s určitou frekvencí a amplitudou do potrubního systému, v kterém je médium poháněno čerpadlem s určitým průtokem [13].

Zde jsou instrukce, podle kterých byl experiment prováděn za cílem diagnostiky hydraulického obvodu. V rámci měření byly následující hodnoty postupně měněny

- průtok 2 – 12 l/s s krokem 2 l/s,
- zdvih hydraulického válce - 10mm, 20mm, 30mm,
- vzrušující frekvence 0 – 12Hz s krokem 2Hz. Celkem bylo změřeno 126 nastavení [13].

Z naměřených průběhů byla vybrána nastavení pro demonstraci

- průtok - 10 l/s
- zdvih - 30mm
- nárůst frekvence - 12Hz [13].

Střední hodnota tlaku na vstupu čerpadla pro toto nastavení byla 102kPa. Tvar vlny tohoto tlaku je znázorněn na obr.7-6. Křivka tlaku po připojení výstupu čerpadla a hydraulický píst je zobrazen na obr. 7-7. Střední hodnota tlaku byla 198kPa. Průměrná hodnota točivého momentu byla 13,2Nm, otáčky 1450ot.min⁻¹ a mechanický výkon byl 2013W [13].

Hlavním úkolem je vytvořit totožnou simulaci experimentu s výše popsáním průběhem. Výstupní charakteristiky, které budeme sledovat budou průběhy následujících veličin zaznamenaných po dobu 1s

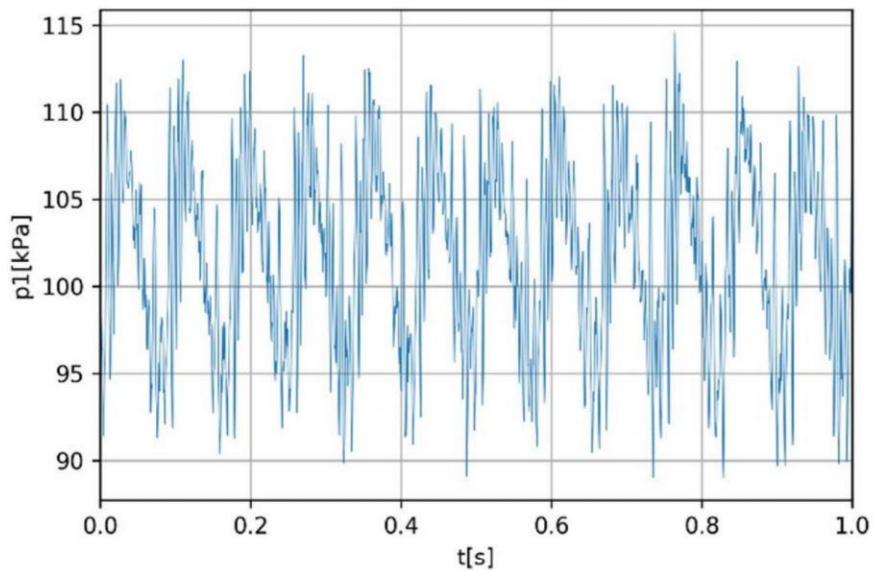
- tlak na vstupu čerpadla p_1
- tlak po připojení výstupu čerpadla a hydraulického berana p_7
- točivý moment M_e
- fázový proud $I_{1,2,3}$

dále budou provedeny pořizeny spektrogramy provedeny metodou FFT z následujících záznamů

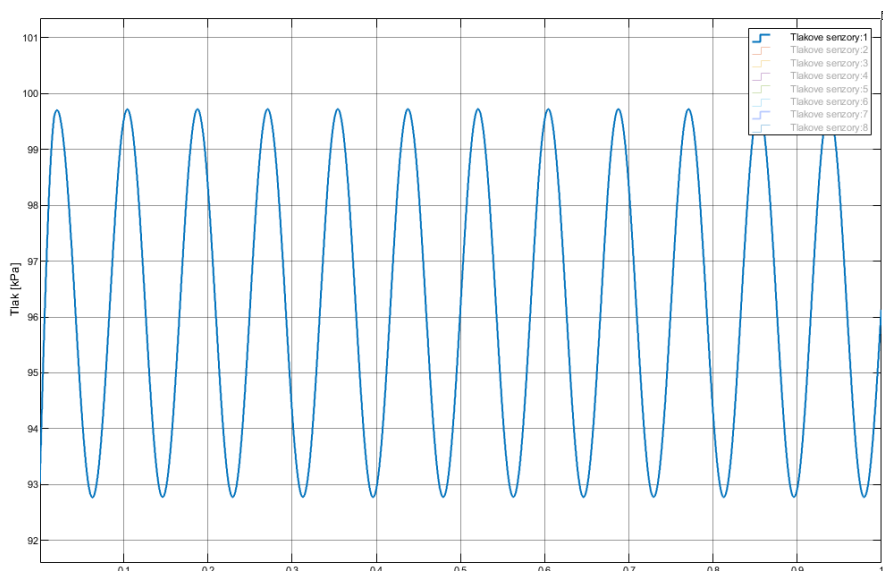
- tlak na vstupu čerpadla p_1
- tlak na hydraulickém pístu p_5
- tlak po připojení výstupu čerpadla a hydraulického berana p_7
- točivý moment M_e
- fázový proud $I_{1,2,3}$
- okamžitý výkon P .

7.5 Srovnání průběhů experimentu a simulace dynamické části

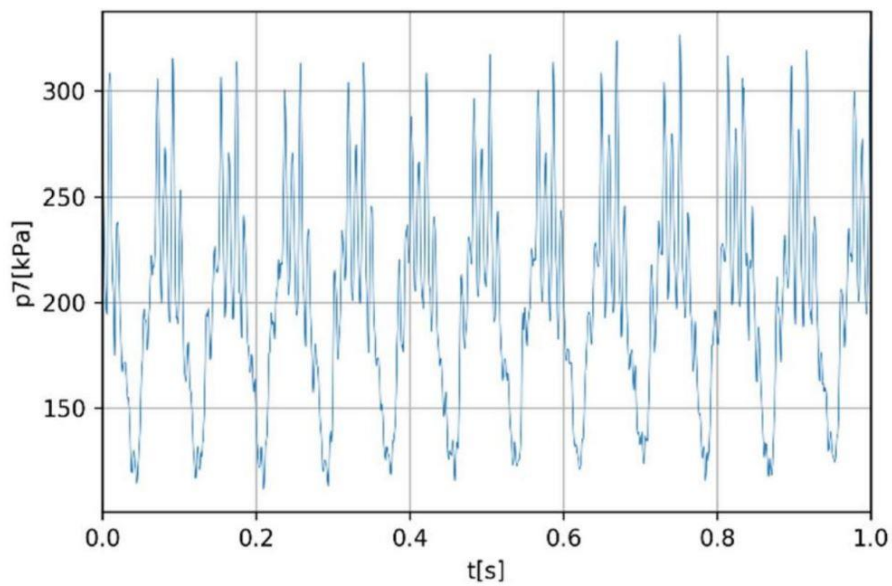
Srovnání dynamické části je založeno na porovnání průběhů experimentálních a simulovaných. Dále jsou v této kapitole srovnány frekvenční analýzy z průběhů experimentálních a simulovaných veličin. Jedná se o zobrazení frekvenčního průběhu FFT, je tedy vhodné se zaměřit na jednotlivé frekvence a hodnot kterých nabývají.



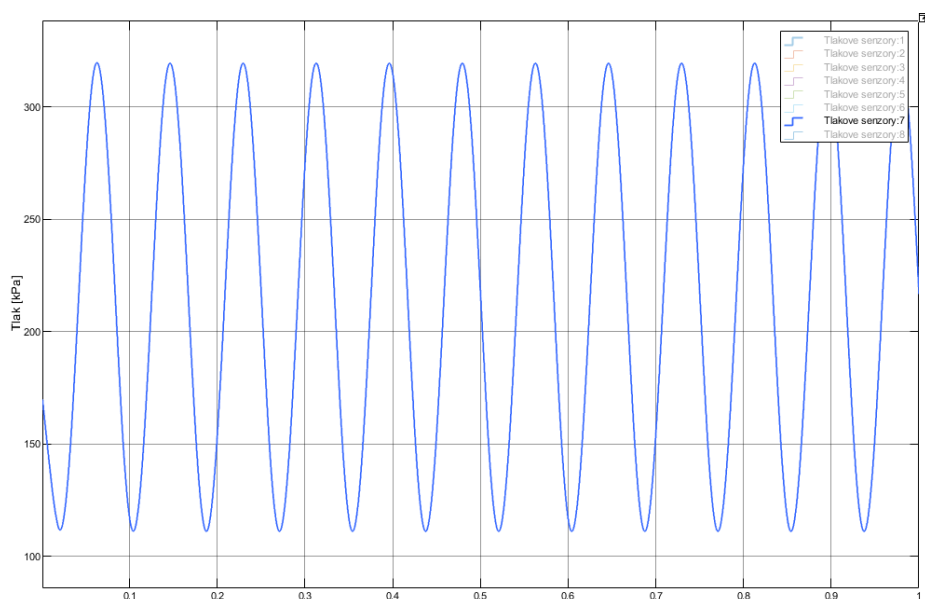
Obr. 7-7 Experimentální vstupní tlak do čerpadla p_1
[Zdroj: 13]



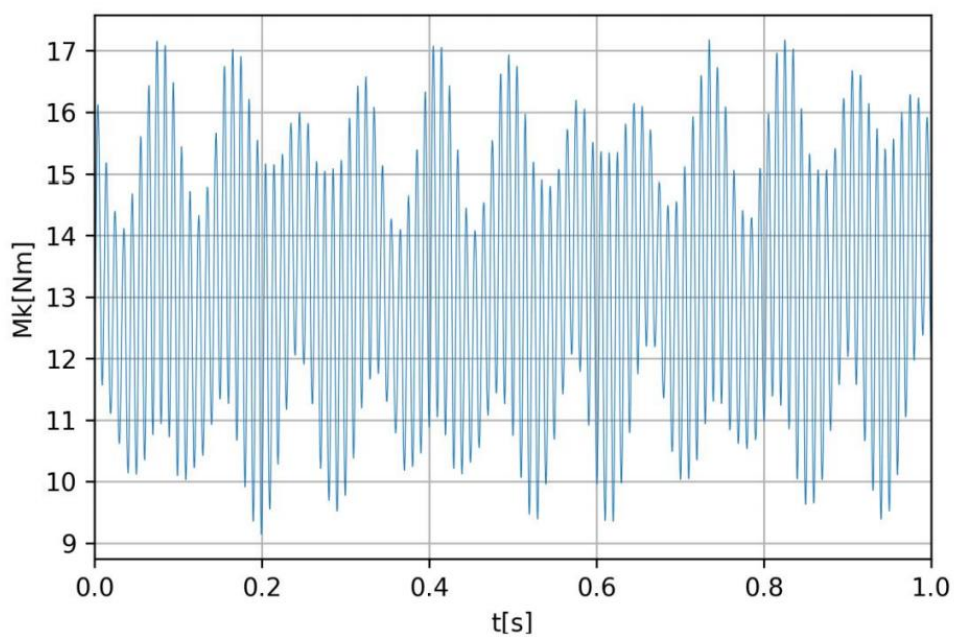
Obr. 7-6 Simulovaný vstupní tlak do čerpadla p_1



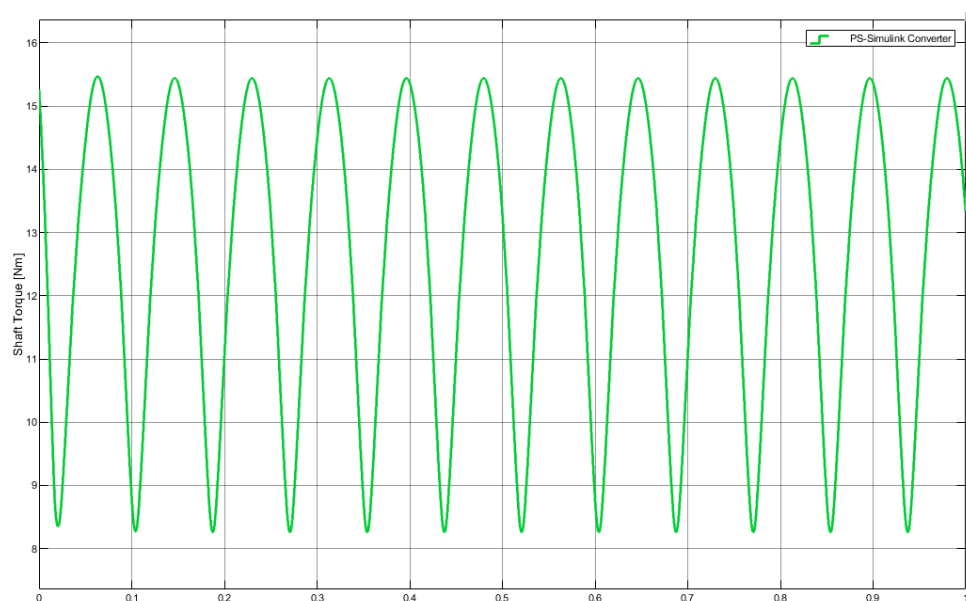
Obr. 7-9 Experimentální tlak na výstupu čerpadla a tlakových pulzací p_7 [Zdroj: 13]



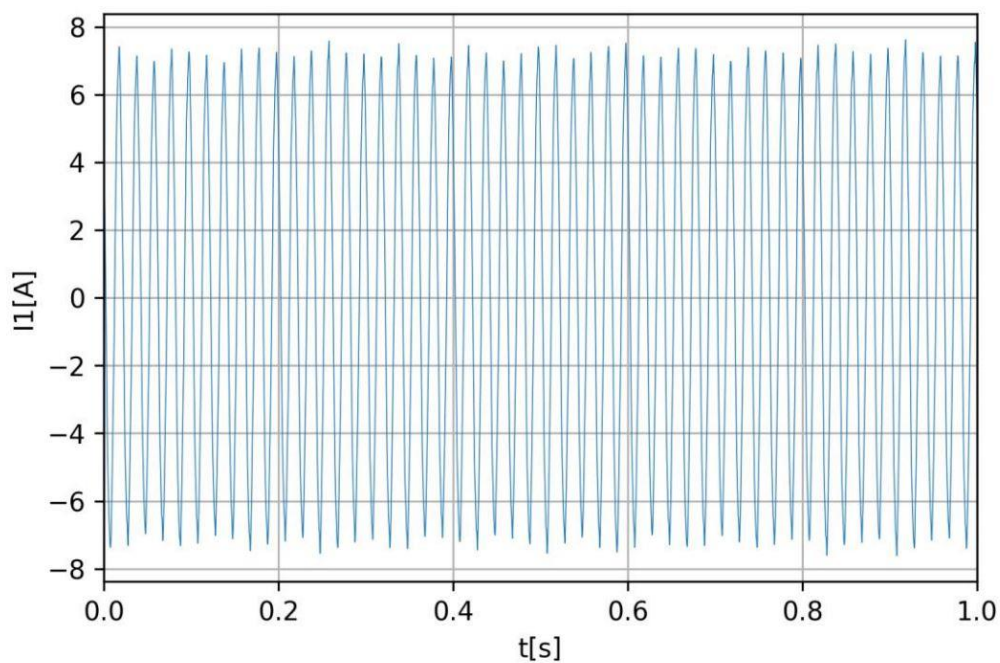
Obr. 7-8 Simulovaný tlak na výstupu čerpadla a tlakových pulzací p_7



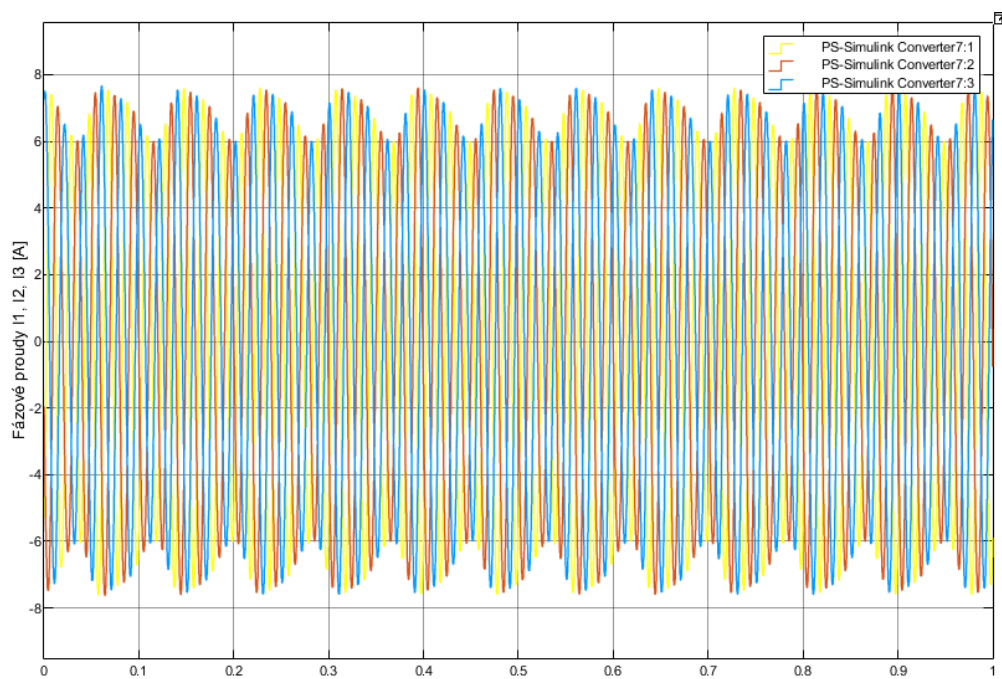
*Obr. 7-11 Experimentální moment na výstupní hřídeli elektromotoru M_k
[Zdroj: 13]*



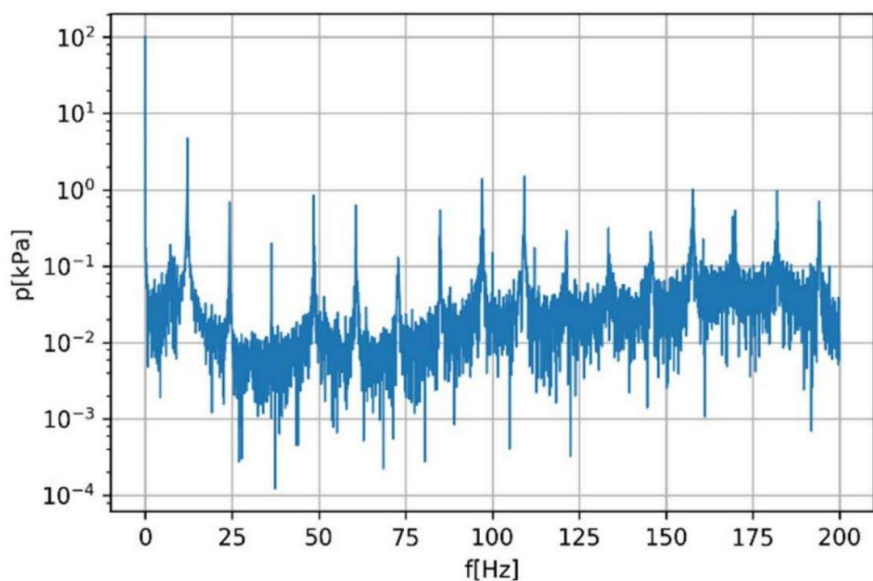
Obr. 7-10 Simulovaný moment na výstupní hřídeli elektromotoru M_k



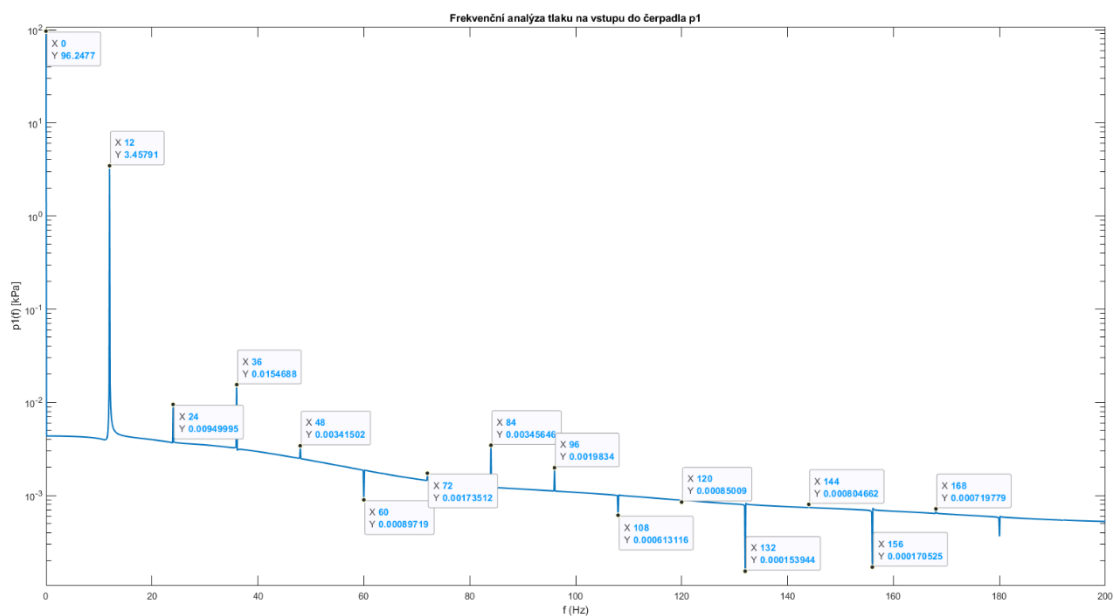
Obr. 7-12 Experimentální fázový proud I_1
[Zdroj: 13]



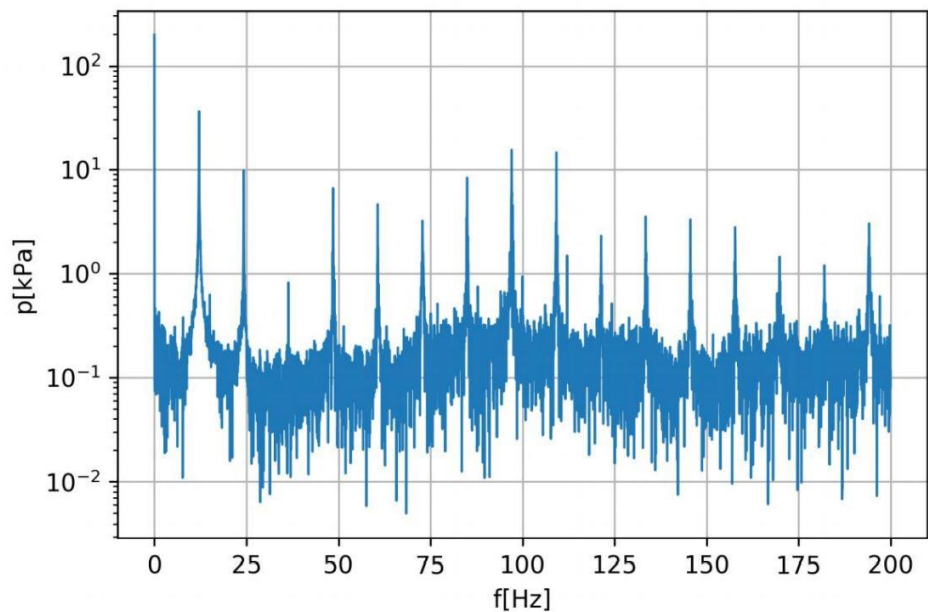
Obr. 7-13 Simulované fázové proudy I_1, I_2, I_3



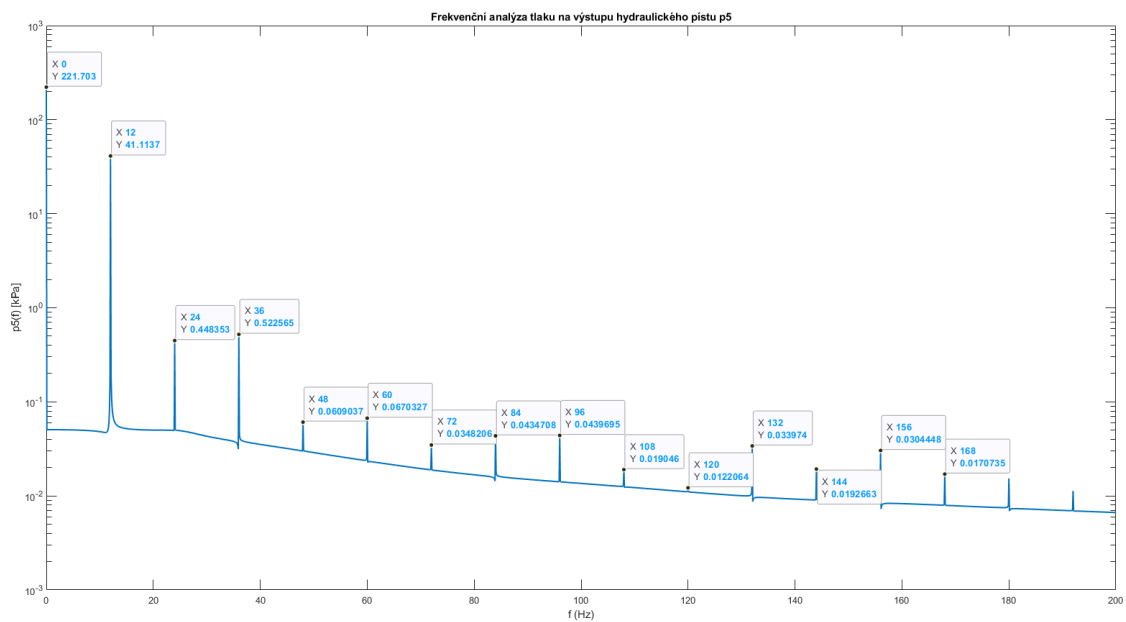
Obr. 7-14 Frekvenční analýza provedená z experimentálních dat tlaku na vstupu do čerpadla p_1
[Zdroj: 13]



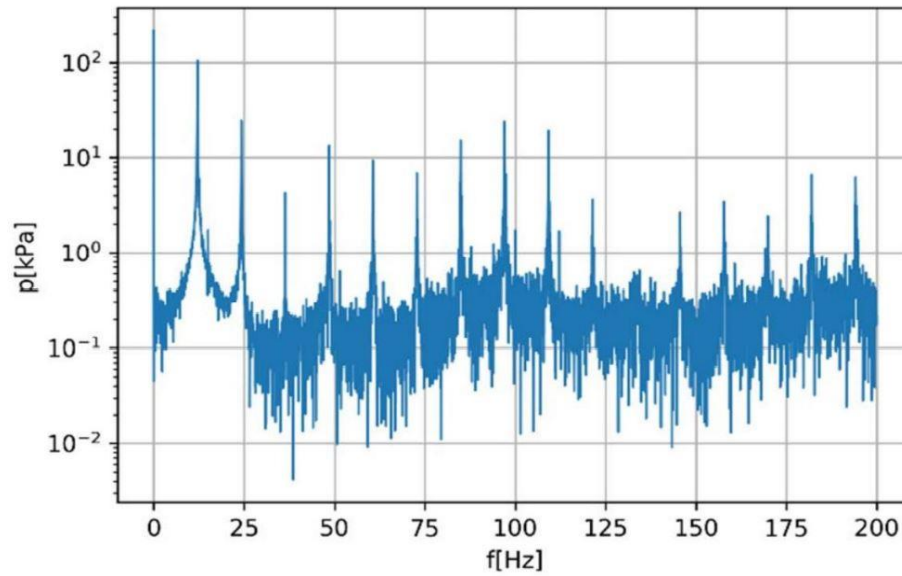
Obr. 7-15 Frekvenční analýza provedená ze simulovaných dat tlaku na vstupu do čerpadla. p_1



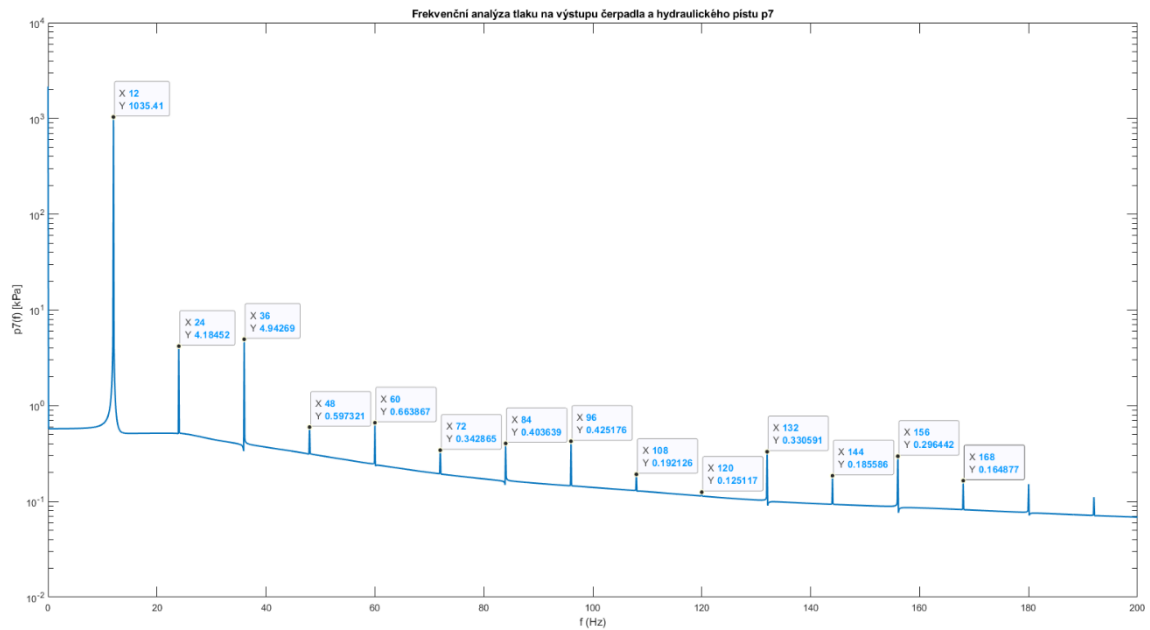
Obr. 7-16 Frekvenční analýza provedená z experimentálních dat tlaku na výstupu hydraulického pístu p_5
 [Zdroj: 13]



Obr. 7-17 Frekvenční analýza provedená ze simulovaných dat tlaku na výstupu hydraulického pístu p_5



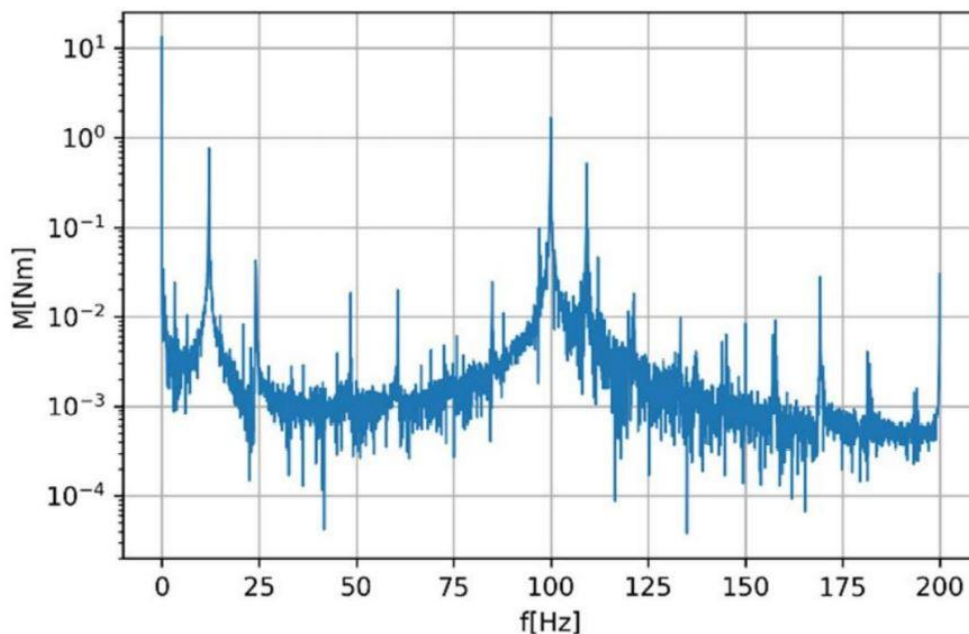
Obr.7-18 Frekvenční analýza provedená z experimentálních dat tlaku na výstupu čerpadla a hydraulického pístu p_7
[Zdroj: 13]



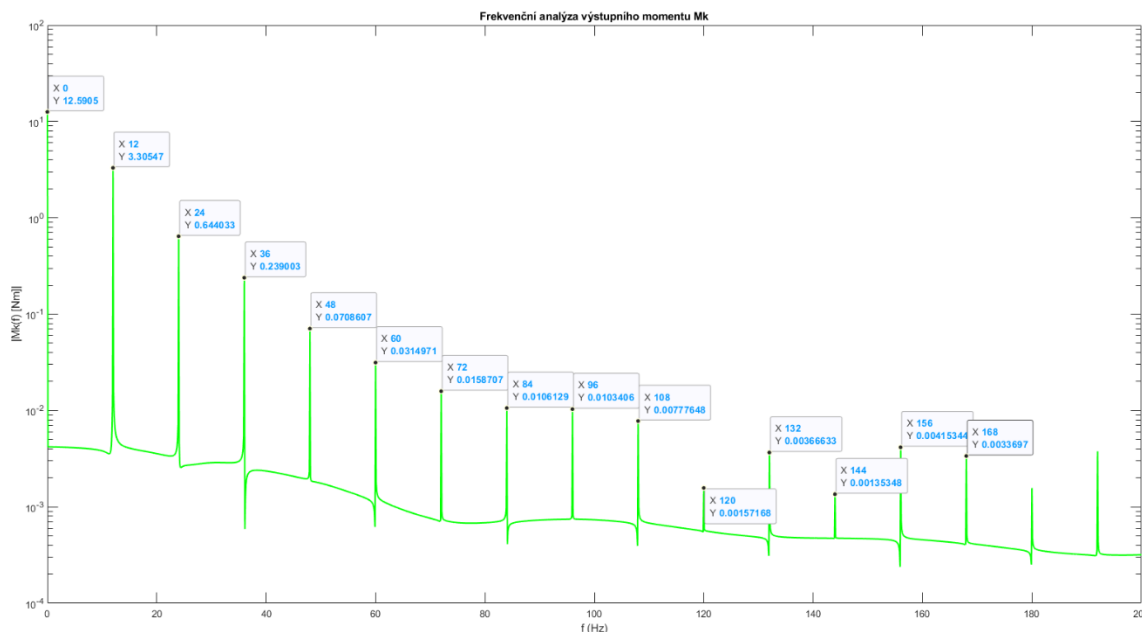
Obr. 7-19 Frekvenční analýza provedená ze simulovaných dat tlaku na výstupu čerpadla a hydraulického pístu p_7

Důležité frekvence na spektrogramech tlaku:

- 0 Hz – střední hodnota tlaku
- 12 Hz – tlaková pulzace (a násobky její frekvence).



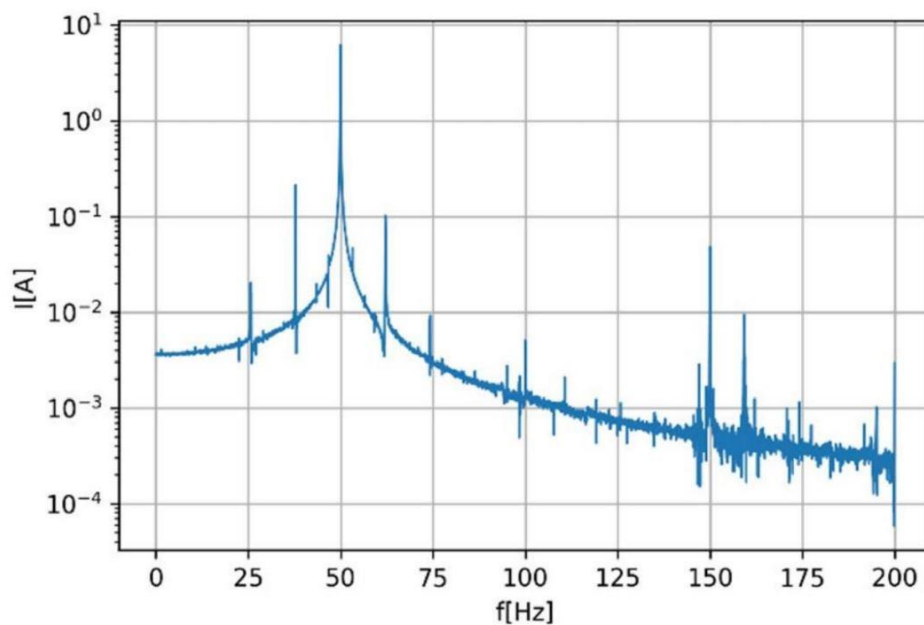
Obr. 7-20 Frekvenční analýza provedená z experimentálních dat momentu na výstipní hřídeli elektromotoru M_k
 [Zdroj: 13]



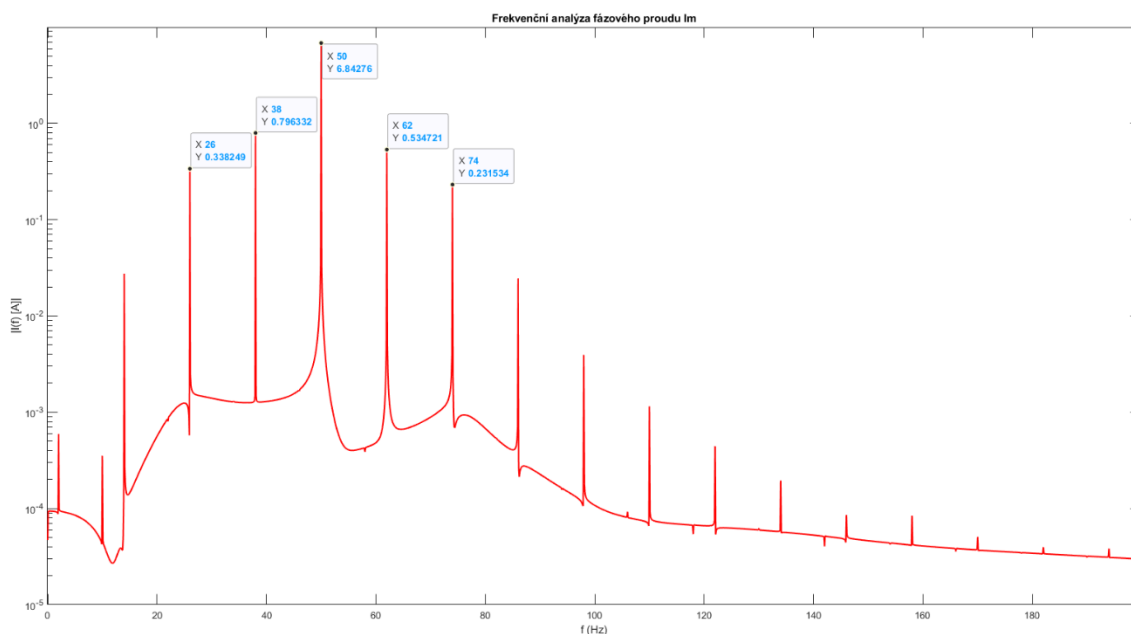
Obr. 7-21 Frekvenční analýza provedená ze simulovaných dat momentu na výstipní hřídeli elektromotoru M_k

Důležité frekvence na spektrogramech točivého momentu:

- 0 Hz – střední hodnota točivého momentu
- 12 Hz – tlaková pulzace (a násobky její frekvence)
- 100 Hz – hodnota zvlnění momentu daná hodnotou asymetrie energetického zařízení.



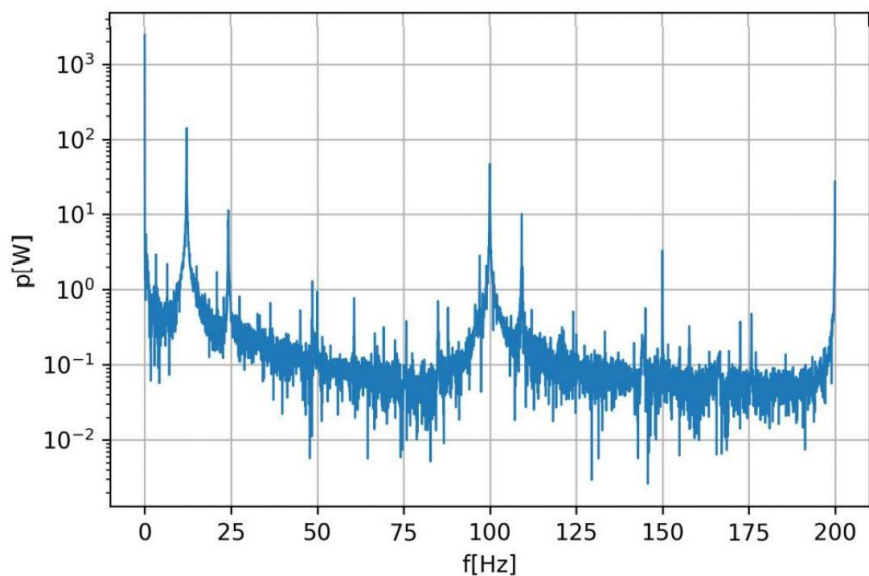
Obr. 7-22 Frekvenční analýza provedená z simulovaných experimentálních dat fázového proudu I_1
[Zdroj: 13]



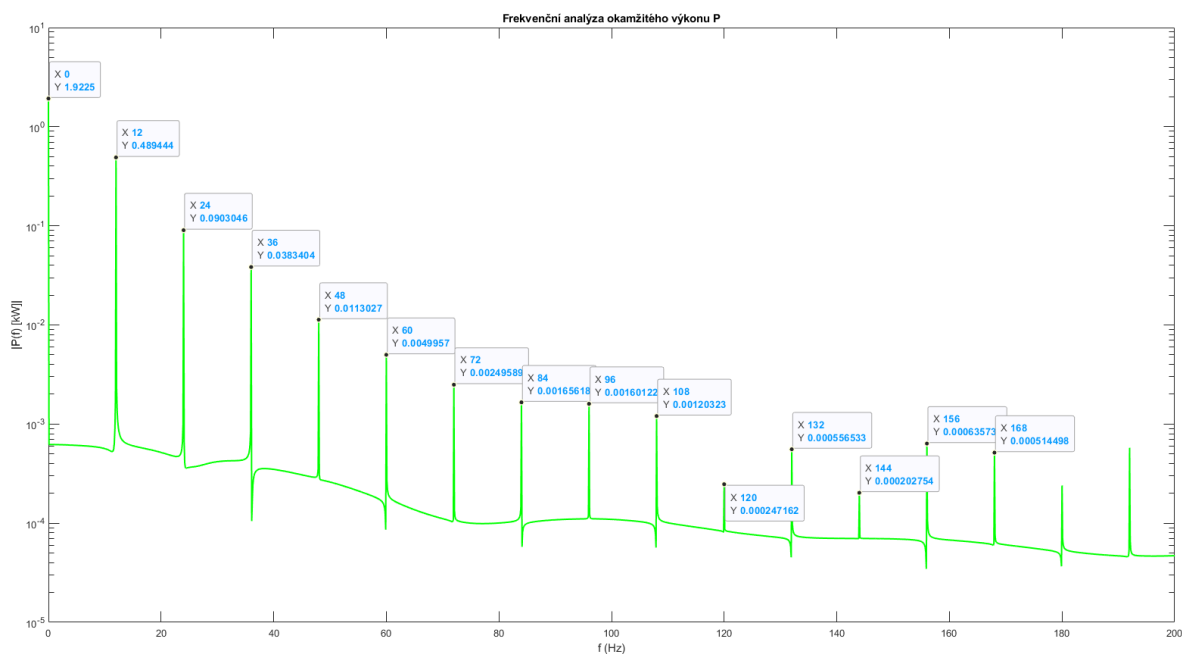
Obr. 7-23 Frekvenční analýza provedená ze simulovaných dat fázových proudů I_1, I_2, I_3

Důležité frekvence spektrogramech proudu:

- 38 Hz, resp. 62 Hz – frekvence pulzace tlaku (a násobky této frekvence – rovnice 18)
- 50 Hz – napájecí frekvence
- 150 Hz – třetí harmonická napájecí frekvence.



obr. 7-24 Frekvenční analýza provedená z experimentálních dat okamžitého výkonu P
 [Zdroj: 13]



Obr. 7-25 Frekvenční analýza provedená ze simulovaných dat okamžitého výkonu P

Důležité frekvence na spektrogramech okamžitého výkonu:

- 0 Hz – střední hodnota výkonu, resp. velikost první harmonické frekvence proudu
- 12 Hz – frekvence tlakového impulzu (viz násobky)
- 100 Hz – hodnota zvlnění momentu daná hodnotou asymetrie elektromotoru.

7.6 Zhodnocení dosažených výsledků obou částí

V *statické části* je hydraulický systém popsán pomocí veličin rozdělených do tříd veličin hydraulického obvodu a tříd veličin čerpadla a asynchronního motoru. Z těchto charakteristik následně byli vypočteny a srovnány tyto veličiny:

- *Měrná energie čerpadla* – tato veličina se nachází ve všech grafech a slouží jako orientace chování čerpadla při průběhu jiné charakteristiky. U skoro nulového průtoku se liší v řádech 10 kPa , což činí chybu kolem 10%. U nejsilnějšího průtoku vyšli výsledky simulace a experimentu téměř shodné.
- *Výtlak čerpadla* – u nejslabšího průtoku činí rozdíl skutečného a simulovaného tlaku cca 10 kPa , což činí chybu zhruba 5%. U nejsilnějšího průtoku vyšli výsledky simulace a experimentu téměř shodné.
- *Hydraulický výkon čerpadla* – u nejslabšího a nejsilnějšího průtoku jsou hodnoty téměř totožné. V průběhu se charakteristik byla hodnota simulace vyšší v řádu jednotek procent.
- *Příkon elektromotoru* – simulovaná hodnota má téměř podobný průběh jako experimentální, experimentální průběh je vyšší od simulovaného v řádech jednotek procent po celé délce spektra.
- *Fázový proud elektromotoru* – u nejslabšího průtoku je charakter simulovaného a experimentálního průběhu téměř shodný. Po celém průběhu se hodnota liší v řádech jednotek procenta. Hodnota simulovaného proudu u nejsilnějšího proudu je menší v řádech jednotek procenta.

V *dynamické části* jsou při daném průtoku $Q = 10\text{ l/s}$, frekvenci pulzací $f = 12\text{ Hz}$ a amplitudě pulzací 150 kPa sledovány průběhy po dobu 1 s u těchto veličin:

- *Tlak na vstupu do čerpadla p_1* – tlakové pulzace se projeví u experimentálního i simulovaného průběhu se sinusovým průběhem s uvažovanou frekvencí. Střední hodnota a amplituda se liší v řádech jednotek kPa , což činí rozdíl zhruba 10%.
- *Tlak na výstupu čerpadla a tlakového pístu p_7* – tlakové pulzace se projeví u experimentálního i simulovaného průběhu se sinusovým průběhem s uvažovanou frekvencí. Střední hodnota a amplituda se liší v řádech kPa , což činí rozdíl v řádech jednotek procenta.
- *Moment na výstupní hřídeli elektromotoru* – tlakové pulzace se projeví u experimentálního i simulovaného průběhu se sinusovým průběhem s uvažovanou frekvencí. Střední hodnota je téměř totožná, amplituda se liší v řádech jednotek Nm , což činí rozdíl zhruba 10%.
- *Fázový proud v elektromotoru I_1* – amplituda a střední hodnota proudu jsou téměř totožné. Tlakové pulzace se projeví jak u experimentu, tak u simulace zvlněním hodnoty amplitudy proudu s rozdílem v řádech jednotek procent.

Dalším krokem bylo provedení frekvenční analýzy *FFT* (*Fast Fourier Transformation*) u následujících průběhů těchto veličin:

- *Tlak na vstupu do čerpadla p_1* – sledované frekvence tlakových pulzací byli rozeznatelné na frekvenční analýze jak u experimentálního, tak u simulovaného průběhu. Tlakové špičky (amplitudy) mají podobný charakter u jednotlivých frekvencí, ovšem u frekvenční analýze ze simulovaných hodnot jsou tlakové špičky výrazně menší.
- *Tlak na výstupu tlakového pístu p_5* – sledované frekvence tlakových pulzací byli rozeznatelné na frekvenční analýze jak u experimentálního, tak u simulovaného průběhu. Tlakové špičky (amplitudy) mají podobný průběh hodnot u jednotlivých frekvencí.
- *Tlak na výstupu čerpadla a tlakového pístu p_7* – sledované frekvence tlakových pulzací byli rozeznatelné na frekvenční analýze jak u experimentálního, tak u simulovaného průběhu. Tlakové špičky (amplitudy) mají podobný průběh hodnot u jednotlivých frekvencí.
- *Moment na výstupní hřídeli elektromotoru* – sledované frekvence tlakových pulzací byli rozeznatelné jak u experimentálního, tak u simulovaného průběhu. Tlakové špičky (amplitudy) mají podobný průběh hodnot u jednotlivých frekvencí. Frekvence zvlnění momentu daná hodnotou asymetrie energetického zařízení není na frekvenční analýze simulovaného průběhu viditelná.
- *Fázový proud elektromotoru* – sledované frekvence tlakových pulzací byli rozeznatelné na frekvenční analýze jak u experimentálního, tak u simulovaného průběhu. U frekvenční analýze simulovaného průběhu jsou tlakové špičky výrazně vyšší než u experimentálního průběhu. Napájecí frekvence a třetí harmonická frekvence se projeví na frekvenční analýze u experimentálního i simulovaného průběhu.
- *Okamžitý výkon elektromotoru* – sledované frekvence tlakových pulzací byli rozeznatelné jak u experimentálního, tak u simulovaného průběhu. Tlakové špičky (amplitudy) mají podobný průběh hodnot u jednotlivých frekvencí. Frekvence zvlnění momentu daná hodnotou asymetrie energetického zařízení není na frekvenční analýze simulovaného průběhu viditelná.

8 ZHODNOCENÍ A DISKUZE

Dosažené výsledky je možno reprezentovat jako dostačující pro diagnostiku. V případě této závěrečné práce se jedná o projevy změn v hydraulických parametrech na čerpadle a elektromotoru. Diagnostika nepřímou metodou tedy může odhalit nepříznivé jevy, které mohou vést k poškození součástí obvodu nebo selhání celého systému. V práci bylo dosaženo vytvoření diagnostického modelu, který demonstruje diagnostiku tlakových pulzací z čerpadla a elektromotoru. V řešení této práce se nezmiňují žádné konkrétní poruchy, které mohou být zapříčiněny tlakovými pulzacemi. V tomto systému totiž operuje elektromotor jako ideální stroj, ve skutečnosti však probíhá přenos z napájecího napětí na motor jako zátěž statoru a rotoru, kde se vytváří indukované elektromotorické napětí. Právě změnu zátěže u elektromotorů studovali kolegové z elektrotechnické fakulty v literatuře [14] a [37].

Využití je možno nalézt v budování hydraulických a potrubních systémů. Jelikož chování systému by popisovala složitá funkce, je výhodnější vytvořit model v simulačním prostředí. Ten bývá ve většině případů unikátní, proto je v práci popsán systematický rozbor a tvorba modelu velmi detailně. Na vytvořeném modelu podle potřebných parametrů je možné testovat velké množství kombinací nastavení. Také inovace části systému nebo předělání samotné podstaty jsou možné a dle mého názoru výhodné (časově i ekonomicky), jelikož existuje s předstihem odhalit problémy, které by v provozu způsobily značné škody na zdraví a majetku. Model poskytuje informace o průbězích důležitých veličin a spektrogramy těchto dat. Hodnotu pulzací lze vyčíst jak z průběhů, tak ze spektrálních analýz z hodnot experimentálních i simulovaných.

V dnešní době je technická diagnostika na takové úrovni, že je možné vytvořit inteligentní model(y). Pomocí strojového učení je možné vytvořit pro model sady hodnot nominálního a poruchového chování, podle kterých se určí aktuální stav. To je možné také s vytvořeným modelem v této práci, kdy v přidruženém programu MATLAB použijeme příkaz pro spuštění paralelních simulací s různými vstupy. Jedná se o zmíněných 126 nastavení, podle kterých experiment probíhal. S těmito daty je možné vytvořit datovou banku, která obsahuje informace o poruchových a nominálních stavech a může operovat na cloudu jako aktivní on-line diagnostika.

9 ZÁVĚR

V této závěrečné práci byla věnována pozornost diagnostice stroje založené na modelech. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Hned po úvodu do problematiky následuje první kapitola obsahující teoretický úvod do diagnostiky založené na modelech. V podkapitolách je věnována pozornost jednotlivým druhům diagnostických modelů.

Po popsání potřebné teorie byla v další kapitole rozebírána praktická část závěrečné práce. Ta má 2 části – v první půlce byl představen předložený stroj pro diagnostiku. Jedná se o hydraulický potrubní systém, do kterého jsou přiváděny tlakové pulzace. Systém byl podroben ještě hlubšímu rozboru na takové úrovni, aby bylo možné převést systémové prvky do simulačního prostředí. Na úvod druhé poloviny je představeno simulační prostředí MATLAB Simulink, kde se odehrává simulace modelu. Následně jsou popsány procesy, kdy jsou převáděny systémové prvky do prvků simulačního prostředí (pomocí simulačních bloků). Po vložení potřebných parametrů do bloků jsou tvořeny subsystémy a následuje zapojení celého systému.

Po dokončení praktické části, tedy vytvoření diagnostického modelu v simulačním prostředí následuje popsání shody systému s diagnostickým modelem. Ta spočívá v ověření statické části – snímání průběhů diagnostických veličin bez přiváděných tlakových pulzací. Charakteristiky se skládají z obvodových veličin a veličin čerpadla a elektromotoru. Snímání charakteristik probíhalo rozběhem motoru a čerpadla na plný výkon (tudíž i plný průtok). Postupným zaškrcením průtoku pomocí škrťacího klapkového ventilu na výtlačném potrubí se snižoval průtok na minimum a byly pořízeny charakteristiky. Totožným způsobem se postupovalo v případě simulace, kde byla dosažena shoda s chybou v řádech jednotek procenta.

V dynamické části se do obvodu při známém průtoku přiváděli tlakové pulzace o známé frekvenci a amplitudě. Bylo vytvořeno celkem 126 kombinací nastavení, ze kterých bylo vybráno jedno nastavení pro demonstraci dané diagnostické metody. Simulace spočívala také v spouštění simulačního modelu pomocí skriptu, který spouští model se zadanými vstupními parametry. V rámci praktické části byl vytvořen skript, který zvládne paralelně spustit všech 126 zmíněných kombinací nastavení, neexistují však experimentální data, se kterými by simulovaná data šla porovnat. Proto je v popsání shody dynamické části porovnáváno právě jedno vybrané nastavení, u kterého byli sledovány veličiny hydraulického obvodu, čerpadla a motoru. Ze sledovaných veličin byli provedeny frekvenční analýzy, u kterých byli porovnávány tlakové špičky na předpokládaných frekvencích. V ověření shody je dokázáno, že tlakové pulzace vyvolané v hydraulickém obvodu se projeví jak na veličinách čerpadla, tak elektromotoru, a můžeme tedy prohlásit, že diagnostika nepřímou metodou na diagnostickém modelu vytvořeném v simulačním prostředí funguje.

Výstup v podobě přílohy této závěrečné práce, je přiložen samotný model programu Simulink MATLAB R2020b, na kterém byla diagnostika v simulačním prostředí prováděna. Dále je obsažen skript programu MATLAB R2020b, kterým se model spouští a zadávají se doň vstupní parametry. V poslední řadě je také přiložen skript MATLAB R2020b, který dokáže nahrát paralelní simulaci všech zmíněných nastavení parametrů.

Co se týče odkazu a užitečnosti této závěrečné práce pro praxi, existuje potenciál, že obsah této práce poslouží v oblasti diagnostiky nebo oboru fluidního/hydraulického průmyslu. V kapitolách systematického rozboru je pohled na jednotlivé prvky obvodu. U každého prvku je popis jeho chování a potřebných fyzikálních veličin. V druhé části systematického rozboru je tvorba diagnostického modelu v prostředí Simulink MATLAB, která může být v mnoha ohledech velmi nejasná. Technická disciplína diagnostika je poměrně mladá a rozvíjející se oblast, která dle mého názoru bude zastávat větší a větší roly v pokroku s automatizací. Proto vidím potenciál, že budou vznikat podobné práce, které mají za úkol simulovat reálný diagnostický systém. Vzniklý model v praktické části může sloužit jako ukázka toho, co se děje uvnitř potrubního systému, když v něm nastanou tlakové pulzace.

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ZUTH, Daniel. Technická diagnostika I: Úvod do technické diagnostiky [online]. Brno, 2019 [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://moodle.vutbr.cz/>. Studijní text. Vysoké učení technické – Fakulta strojního inženýrství.
- [2] ZUTH, Daniel. Technická diagnostika I: Diagnostický prostředek a systém [online]. Brno, 2019 [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://moodle.vutbr.cz/>. Studijní text. Vysoké učení technické – Fakulta strojního inženýrství.
- [3] ZUTH, Daniel. Technická diagnostika I: Diagnostický model [online]. Brno, 2019 [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://moodle.vutbr.cz/>. Studijní text. Vysoké učení technické – Fakulta strojního inženýrství.
- [4] DAIGLE, Matthew a ROYCHOUDHURY, Indranil. An Integrated Model-Based Diagnostic and Prognostic Framework. [Online] SGT Inc., NASA Ames Research Center, 2011. [Citace: 14. 5 2021.] Dostupné z: <https://data.nasa.gov/dataset/An-Integrated-Model-Based-Diagnostic-and-Prognosti/3caj-bd83>.
- [5] DAIGLE, Matthew. Model-Based Prognostics. [Online] Prognostics Center of Excellence, Intelligent Systems Division, NASA Ames Research Centre, 2014. [Datum: 14. 5 2021.] Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20180006628/downloads/20180006628.pdf>.
- [6] DAIGLE, Matthew, KOUTSOUKOS, Xenofon a BISWAS, Guatam. An event-based approach to integrated parametric and discrete fault diagnosis in hybrid systems. London, England: SAGE Publications. [Online] Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2010. [Datum: 14. 5 2021.] Dostupné z: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0142331208097840>.
- [7] PICARDI, Claudia. A short tutorial on model-based diagnosis. [Online] 2005. [Datum: 11. 5 2020.]. Dostupné z: <http://www.di.unito.it/~botta/didattica/dispenseDiagnosi.pdf>.
- [8] PAP, Zoltán, CSOPAKI, GYULA a DIBUZ, Sarlota. On FSM-based Fault Diagnosis. [Online] Department of Telecommunications and Media Informatics, Budapest University of Technology and Economics, 2005. [Datum: 14. 5 2021.] Dostupné z: <http://dl.ifip.org/db/conf/pts/testcom2005/PapCD05.pdf>.
- [9] MOSTERMAN, Pieter J. a BISWAS, Guatam. Diagnosis of continuous valued systems in transient operating regions. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Syssems and Humans. [Online] 1999. [Datum: 14. 5 2021.] Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=798059>. ISSN 1083-4427.

- [10] TUDOROIU, Nicolae, ZAHEERUDDIN, Mohammed, TUDOROIU, Roxana-Elena, RADU, Sorin Mihai. Fault Detection, Diagnosis, and Isolation Strategy in Li-Ion Battery Management Systems of HEVs Using 1-D Wavelet Signal Analysis. [Online] 2020. [Datum: 14. 5 2021.] Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/wavelet-theory/fault-detection-diagnosis-and-isolation-strategy-in-li-ion-battery-management-systems-of-hevs-using->.
- [11] DAIGLE, Matthew, KOUTSOUKOS, Xenofon a BISWAS, Guatam. An event-based approach to integrated parametric and discrete fault diagnosis in hybrid systems. London, England: SAGE Publications. [Online] Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2010. [Datum: 14. 5 2021.] Dostupné z: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/0142331208097840>. ISSN 0142-3312.
- [12] BREGON, Anibal; DAIGLE, Matthew; ROYCHOUDHURY, Indranil; BISWAS, Gautam; KOUTSOUKOS, Xenofon; PULIDO, Belarmino. An event-based distributed diagnosis framework using structural model decomposition. Artificial intelligence. [Online] Elsevier B.V, 2014. [Datum: 21. 01 2021.] Dostupné z: <https://dl.acm.org/doi/10.5555/2743145.2743771>.
- [13] HUZLÍK, Rostislav; HABÁN, Vladimír; KROUPA, Martin; HUDEC, Martin. Evaluation of pressure pulsation frequency by motor current signature analysis. [Online] Vysoké učení technické v Brně - Fakulta strojního inženýrství, 2018. [Datum: 14. 5 2021.] Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8624666>.
- [14] PAVLÁČEK, J. Analýza dynamického chování zátěže z měření statorových proudů asynchronního motoru. Brno. Vysoké učení technické v Brně – Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 55 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Rostislav Huzlík
- [15] BETA - Horizontální odstředivá spirální čerpadla. [Online] BETA CZ. [Datum: 14. 5 2021.]. Dostupné z: https://www.cerpadla.cz/materials/files/PDF/01_BETA_CZ.pdf.
- [16] Centrifugal Pumps Review. [Online] Engineers Edge, LLC. [Datum: 14. 5 2021.]. Dostupné z: https://www.engineersedge.com/pumps/centrifugal_pump.htm.
- [17] HOMEL. Čerpadla - Základní parametry. [Online] Vysoká škola baňská v Ostravě. [Datum: 14. 5 2021.]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~jan58/Tp_1/30_2_Cerpadla-zakladni%20parametry.pdf.
- [18] Asynchronní elektromotor. Třífázové - Motory řady TM2 s účinností IE2. [Online] EMP. [Datum: 14. 5 2021.]. Dostupné z: <http://www.emp-slavkov.cz/products/trifazove-motory-motory-rady-tm2-s-ucinnosti-ie2?locale=cs>.
- [19] BEŠTA, Miloš. Asynchronní stroj. Trojfázové asynchronní stroje. [Online] [Datum: 14. 5 2021.]. Dostupné z: <http://www.mbest.cz/wp-content/uploads/2016/04/T2-asynchronn%C3%AD-stroj.pdf>.

- [20] Supreme Steel Pipe Corporation. [Online] Dostupné z: <https://supremepipe.com/blog/why-hydrotesting-important-testing-quality-steel-pipes/>.
- [21] KRÁLOVÁ, Magda. Techmania Eduportál. Proudění tekutin. [Online] [Datum: 14. 5 2021.]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/tekutiny/proudeni-tekutin>.
- [22] KRÁLOVÁ, Magda. Techmania Eduportál. Bernoulliho rovnice. [Online] [Datum: 14. 5 2021.]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/tekutiny/bernoulliho-rovnice>.
- [23] KRÁLOVÁ, Magda. Techmania Eduportál. Proudění reálné tekutiny. [Online] [Datum: 14. 5 2021.]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/tekutiny/proudeni-realne-tekutiny>.
- [24] KARANOVIC, Velibor. Determination of Pressure Losses in Hydraulic Pipeline Systems by Considering Temperature and Pressure. [Online] Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering, 2009. [Datum: 14. 5 2021.] https://www.researchgate.net/publication/235735436_Determination_of_Pressure_Losses_in_Hydraulic_Pipeline_Systems_by_Considering_Temperature_and_Pressure.
- [25] T-kus DN 50. [Online] Plastick.eu. Dostupné z: <https://plastick.eu/d/t-kus-dn-50-1002249/>.
- [26] ŠTIGLER, Jaroslav, a iní. The Fluid Flow in the T-Junction. The Comparison of the Numerical Modeling and Piv Measurement. [Online] Brno University of Technology, Victor Kaplan Department of Fluid Engineering, 2012. [Datum: 14. 5 2021.]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705812023892?via%3Dihub>.
- [27] Topenilevne. Nerez koleno 90°- DN 50 - 2" M/ F. [Online] Dostupné z: <https://www.topenilevne.cz/nerez-koleno-90-dn-50-2-m-f-p98058/>.
- [28] NUGROHO, Setyo, HIDAYATULLOH, Achmad Arifudin. Performance Analysis of The Effect on Insertion Guide Vanes For Rectangular Elbow 900 Cross Section. [Online] EMITTER International Journal of Engineering Technology, 2016. [Datum: 14. 5 2021.]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/reader/192907750>.
- [29] Pneumat system s.r.o. Dvojité excentrický klapkový ventil DN50 A21WCB / CF8M. [Online]. Dostupné z: <https://www.pneumatystem.cz/dvojity-excentricky-klapkovy-ventil-dn50-a21wcb-cf8m-detail>.
- [30] BAUHAUS. IBC kontejner repasovaný s vymytou nádobou. [Online]. Dostupné z: <https://www.bauhaus.cz/ibc-kontejner-repasovany-s-vymytou-nadobou-24811646>.
- [31] DATAFLEX – Torque measuring shaft type 22/... [Online] 2017. [Datum: 14. 5 2021.]. Dostupné z: <https://www.ktr.com/fileadmin/ktr/media/Manuals/49011en000000.pdf>.

- [32] DMP 331/333 Snímače relativního a absolutního tlaku. NÁVOD. [Online] JSP Industrial Controls, 2019. [Datum: 14. 5 2021.]. Dostupné z: <https://www.jsp.cz/files/d0028npcz.pdf>.
- [33] Magneticko–indukční průtokoměr. Uživatelská příručka. [Online] ELA, spol. s.r.o., 2018. [Datum: 14. 5 2021.]. Dostupné z: <http://www.elabrno.cz/wp-content/uploads/2020/02/CZ-n%C3%A1vod-MQI-99-C-S.pdf>.
- [34] Agilent 1146B AC/DC Current Probe. User's Guide. [Online] Agilent Technologies, 2013. [Datum: 14. 5 2021.]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/2343969.pdf>.
- [35] MARTIKÁN, Miroslav. Praktické měření kleštovým ampérmetrem. DPS Elektronika od A do Z. [Online] 2016. [Datum: 14. 5 2021.] Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/mereni/id:42907/prakticke-mereni-klestovym-ampermetrem>.
- [36] Mathworks. Simscape. [Online] Dostupné z: <https://www.mathworks.com/products/simscape.html#mlsim>.
- [37] KROUPA, M. Analýza změny zátěže asynchronního motoru z měření statorových proudů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 86 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc..

11 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

11.1 Seznam tabulek

Tab.1	Charakteristiky pro popis detekce chyby	str.31
Tab.2	Vstupní charakterizace poruch	str.32
Tab.3	Příklad určení lokální poruchy	str.35
Tab.4	Příklad určení globální poruchy	str.35
Tab.5	Charakteristiky pro definici modelu čerpadla	str.55
Tab.6	Charakteristiky experimentálně naměřených dat I	str.77
Tab.7	Charakteristiky experimentálně naměřených dat II	str.77
Tab.8	Veličiny vypočtené z experimentálně naměřených hodnot pro popsání shody se simulací	str.78

11.2 Seznam obrázků

Obr. 5-1 Schéma hydraulického obvodu podléhajícímu diagnostice [Zdroj: 13]	36
Obr. 5-2 Snímek hydraulického obvodu s tlakovým pulsátorem [Zdroj: 14]	37
Obr. 5-3 Odstředivé čerpadlo BETA 12YC s asynchronním motorem TM104-2 [Zdroj: 15]	38
Obr. 5-4 Asynchronní motor TM104-2 [Zdroj: 18]	39
Obr. 5-5 Konstrukce asynchronního motoru s kotvou na krátko [Zdroj: 19].....	40
Obr. 5-6 Ukázka ocelového potrubí různých světlostí [Zdroj: 20]	41
Obr. 5-7 a) Laminární b) turbulentní proudění. [Zdroj: 21].....	41
Obr. 5-8 Veličiny nutné k popisu proudění v trubici o různém průřezu. [Zdroj: 21].....	42
Obr. 5-9 Zobrazení vektorů rychlostí jednotlivých vrstev podél průřezu potrubí [Zdroj: 23].....	43
Obr. 5-10 Charakteristiky laminárního a turbulentního proudění tekutin v závislosti na Reynoldsově čísle [Zdroj: 24]	45
Obr. 5-11 Tvarová součást T-kus DN50 [Zdroj: 25].....	46
Obr. 5-12 Vektory rychlostí v jednotlivých průřezech potrubí [Zdroj: 26]	46
Obr. 5-13 Tvarová součást – koleno 90° [Zdroj: 27]	46
Obr. 5-14 Zobrazení chování proudění tekutiny v oblasti natočeného průřezu o 90° [Zdroj: 28]	47
Obr. 5-15 Dvojitý excentrický klapkový ventil DN50 A21WCB [Zdroj: 29]	47
Obr. 5-16 Nádrž na vodu 1000 l (ilustrační foto) [Zdroj: 30]	48
Obr. 5-17 Tenzometrická hřídel KTR DATAFLEX 22/20 a) pohled na celé zařízení b) pohled na snímací blok z profilu [Zdroj: 31]	48
Obr. 5-18 Nákres deformace senzoru a schéma zapojení senzoru [Zdroj: 31]	49

Obr. 5-19 Snímek snímače tlaku DMP 331 [Zdroj: 32].....	49
Obr. 5-20 Schéma zapojení snímače tlaku na převod signálu [Zdroj: 32].....	50
Obr. 5-21 Model průtokoměru MGI 99-SN [Zdroj: 33].....	50
Obr. 5-22 Kleštví amperemetr 1146 Agilent [Zdroj: 34].....	51
Obr. 5-23 Princip Hallova jevu [Zdroj: 35].....	51
Obr. 5-24 Použitý tlakový pulsátor (hydraulický válec a motor s vačkou) [Zdroj: 13].....	52
Obr. 6-1 Oblasti spadající pod simulační program Simscape [Zdroj: 36].....	53
Obr. 6-2 Blok odstředivého čerpadla v prostředí Simulink [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	54
Obr. 6-3 Definování charakteru vstupních dat čerpadla [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	54
Obr. 6-4 Možnosti nastavení bloku odstředivého čerpadla [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	55
Obr. 6-5 Blok asynchronního motoru v prostředí Simulink [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	56
Obr. 6-6 Blok střídavého napětí v prostředí Simulink [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	56
Obr. 6-7 Možnosti nastavení bloku zdroje 3-fázového napětí [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	56
Obr. 6-8 Blok elektrické reference v prostředí Simulink [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	57
Obr. 6-9 Blok elektrické reference (3-fázové) v prostředí Simulink [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	57
Obr. 6-10 Blok mechanické rotační reference v prostředí Simulink [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	57
Obr. 6-11 Blok mechanické rotační setrvačnosti v prostředí Simulink [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	57
Obr. 6-12 Možnosti nastavení bloku mechanické rotační reference a) záložka „Hlavní“ b) záložka „Setrvačnost“ [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	57
Obr. 6-13 Možnosti nastavení asynchronního motoru – záložka „Hlavní“ [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	58
Obr. 6-14 Možnosti nastavení asynchronního motoru – záložka „Impedance“ [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	59
Obr. 6-15 Blok hydraulického potrubí v prostředí Simulink [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	59
Obr. 6-16 Blok hydraulické kapaliny v prostředí Simulink [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	60
Obr. 6-17 Možnosti nastavení bloku hydraulické kapaliny [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	60
Obr. 6-18 Možnosti nastavení bloku hydraulického potrubí [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	61
Obr. 6-19 Blok tvarové součásti – T-spojka v prostředí Simulink [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	62
Obr. 6-20 Možnosti nastavení bloku T-spojky [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	62

Obr. 6-21 Blok tvarové součásti – koleno 90° v prostředí Simulink [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	63
Obr. 6-22 Možnosti nastavení bloku koleno [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	63
Obr. 6-23 Blok škrťacího ventilu – klapkový ventil v prostředí Simulink [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	64
Obr. 6-24 Možnosti nastavení bloku škrťacího ventilu – klapkový ventil [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	65
Obr. 6-25 Blok nádrže v prostředí Simulink [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	65
Obr. 6-26 Možnosti nastavení nádrže [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]	66
Obr. 6-27 Blok ideálního senzoru krouživého momentu v prostředí Simulink [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	66
6-28 Blok ideálního snímače rotačního pohybu v prostředí Simulink [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	67
Obr. 6-29 Blok ideálního snímače tlaku v prostředí Simulink [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	67
Obr. 6-30 Blok ideálního snímače průtoku v prostředí Simulink [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	68
Obr. 6-31 Blok ideálního snímače proudu v prostředí Simulink [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	68
Obr. 6-32 Zobrazení a) bloku Subsystém Napájení + Motor v prostředí Simulink b) obsahu bloku Subsystém Napájení + Motor [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	69
Obr. 6-33 Zobrazení a) bloku Subsystém Čerpadlový systém s napájením v prostředí Simulink b) obsahu bloku Subsystém Čerpadlový systém s napájením [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	69
Obr. 6-34 Zobrazení a) bloku Subsystém Pohybový senzor v prostředí Simulink b) obsahu bloku Subsystém Pohybový senzor [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	70
Obr. 6-35 Zobrazení a) bloku Subsystém Pohybový senzor v prostředí Simulink b) obsahu bloku Subsystém Pohybový senzor [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	70
Obr. 6-36 Zobrazení a) bloku Subsystém Tlakový senzor v prostředí Simulink b) obsahu bloku Subsystém Tlakový senzor [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	70
Obr. 6-37 Zobrazení a) bloku Subsystém Napájecí potrubí s tlakovými pulzacemi v prostředí Simulink b) obsahu bloku Subsystém Napájecí potrubí s tlakovými pulzacemi [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	71
Obr. 6-38 Zobrazení a) bloku Subsystém Vyústující potrubí v prostředí Simulink b) obsahu bloku Subsystém Vyústující potrubí [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	71
Obr. 6-39 Zobrazení a) bloku Subsystém Vyústující potrubí v prostředí Simulink b) obsahu bloku Subsystém Vyústující potrubí [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....	72

Obr. 6-40 Zobrazení a) bloku Subsystem nádrže v prostředí Simulink b) obsahu bloku Subsystem	nádrže	
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....		72
Obr. 6-41 Zobrazení a) bloku Subsystem Škrťící ventil v prostředí Simulink b) obsahu bloku	Subsystem	Škrťící ventil
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....		72
Obr. 6-42 Zobrazení a) bloku Subsystem Potrubí z nádrže v prostředí Simulink b) obsahu bloku	Subsystem	Potrubí z nádrže
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....		73
Obr. 6-43 Zapojení celého simulačního systému hydraulického obvodu		
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....		73
Obr. 7-1 Zobrazení bloku Display na veličině Průtok Q		
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....		77
Obr. 7-2 Graf experimentálního a simulačního průběhu výtlaku čerpadla p_3		77
Obr. 7-3 Graf experimentálního a simulovaného hydraulického výkonu čerpadla P_h		78
Obr. 7-4 Graf experimentálního a simulovaného elektrického příkonu P_e		78
Obr. 7-5 Graf experimentálního a simulovaných proudů v elektromotoru		79
Obr. 7-6 Experimentální vstupní tlak do čerpadla p_1 [Zdroj: 13]		82
Obr. 7-7 Simulovaný vstupní tlak do čerpadla p_1		
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....		82
Obr. 7-8 Experimentální tlak na výstupu čerpadla a tlakových pulzací p_7		
[Zdroj: 13].....		83
Obr. 7-9 Simulovaný tlak na výstupu čerpadla a tlakových pulzací p_7		
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....		83
Obr. 7-10 Experimentální moment na výstupní hřídeli elektromotoru M_k		
[Zdroj: 13].....		84
Obr. 7-11 Simulovaný moment na výstupní hřídeli elektromotoru M_k		
[Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....		84
Obr. 7-12 Experimentální fázový proud I_1		85
Obr. 7-13 Simulované fázové proudy I_1, I_2, I_3 [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....		85
Obr. 7-14 Frekvenční analýza provedená z experimentálních dat tlaku na vstupu do čerpadla. p_1 [Zdroj: 13]		86
Obr. 7-15 Frekvenční analýza provedená ze simulovaných dat tlaku na vstupu do čerpadla. p_1 [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....		86
Obr. 7-16 Frekvenční analýza provedená z experimentálních dat tlaku na výstupu hydraulického pístu p_5 [Zdroj: 13]		87
Obr. 7-17 Frekvenční analýza provedená ze simulovaných dat tlaku na výstupu hydraulického pístu p_5 [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]		87
Obr. 7-18 Frekvenční analýza provedená z experimentálních dat tlaku na výstupu čerpadla a hydraulického pístu p_7 [Zdroj: 13]		88
Obr. 7-19 Frekvenční analýza provedená ze simulovaných dat tlaku na výstupu čerpadla a hydraulického pístu p_7 [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b].....		88
Obr. 7-20 Frekvenční analýza provedená z experimentálních dat momentu na výstupní hřídeli elektromotoru M_k [Zdroj: 13]		89

Obr. 7-21 Frekvenční analýza provedená ze simulovaných dat momentu na výstipní hřídeli elektromotoru *Mk* [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]..... 89

Obr. 7-22 Frekvenční analýza provedená z simulovaných experimentálních dat fázového proudu *I1* [Zdroj: 13]..... 90

Obr. 7-23 Frekvenční analýza provedená ze simulovaných dat fázových proudů *I1, I2, I3* [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b] 90

Obr. 7-24 Frekvenční analýza provedená z simulovaných experimentálních dat okamžitého výkonu *P* [Zdroj: 13]..... 91

Obr. 7-25 Frekvenční analýza provedená ze simulovaných dat okamžitého výkonu *P* [Zdroj: Prostředí Simulink MATLAB R2020b]..... 91

11.3 Seznam použitých zkratk

Zkratka	Celý název
SD	System Description (popis systému)
COMPS	Components (části)
OBS	Observations (pozorování)
AB(predicate)	Abnormality predicate (přisuzovatel abnormality)
FSM	Finite state machine (stroj s konečným stavem)
ODR	Obyčejná diferenciální rovnice
FFT	Fast Fourier Rransformation (rychlá Fourierova transformace)

11.4 Seznam použitých veličin

Označení veličiny	Název veličiny	Jednotka veličiny
Δh	Rozdíl vzájemné výšky otvorů nad úrovní nádrže	m
Δp	Nárůst tlaku	Pa
B	Magnetická indukance	T
c_1	Střední rychlost kapaliny v místě p1	m/s
c_2	Střední rychlost kapaliny v místě p2	m/s
d_f	Přechodová funkce	–
$D_{k1,2}$	Světlost připojení kolena 90°	mm
$D_{n1,2}$	Světlost otvoru hrdla v nádrži	mm
$D_{p1,2}$	Světlost potrubí	mm
$D_{Tm,b}$	Světlost připojení T-kusu	mm
$D_{v1,2}$	Světlost škrticího ventilu	mm
E	Modul pružnosti v tahu	Pa
E_k	Kinetická energie	J
E_p	Potenciální energie	J
f	Kmitočet napájecího napětí	Hz
f_r	Rotační frekvence (pro různé zatížení)	Hz
f_s	Napájecí frekvence	Hz
F_T	Třecí síla	N
g	Gravitační zrychlení	m/s^2
g_T	Gradient rychlosti	$m/s.m$
h	Výška sloupce hladiny	m
$I_{1,2,3rms}$	Efektivní hodnota fázového proudu	A
$i_{a,b,c}$	Okamžitá hodnota fázového proudu	A
L	Délka deformačního tělesa tenzometru	m
L_{p11-20}, L_{p11-20}	Délka potrubí	mm
m	Hmotnost	kg
Me	Výstupní moment hřídele elektromotoru	Nm
n	Mechanické otáčky rotoru	s^{-1}
ns	Synchronní otáčky rotoru	s^{-1}
P	Počet pólových dvojic	–
P	Mechanický výkon	W
p_1	Měrný tlak v sacím potrubí	Pa
p_2	Měrný tlak na výtlaku čerpadla	Pa

P_e	Příkon elektromotoru	W
P_m	Okamžitý mechanický výkon	W
p_n	Úroveň stlačení	kPa
Q_v	Objemový průtok	m^3/s
r	Vstupní poloměr rotoru	m
R	Výstupní poloměr z rotoru	m
$R_{1,2,3,4}$	Odpory v obvodu tenzometru	Ohm
R_e	Reynoldsovo číslo	–
R_r'	Přepočtený odpor statoru	Ohm
R_s	Odpor statoru	Ohm
s	skluz elektromotoru	–
S	Průřez potrubí	m^2
S_e	Soubor událostí	–
S_j	Zdánlivá impedance	Ohm
S_n	Obsah podstavy nádrže	m^2
t	Čas	s
U	Indikované napětí průtokoměru	V
u_{a0}, u_{b0}, u_{c0}	Okamžitá hodnota vedení do nuly (fáze)	V
u_{ac}, u_{bc}	Okamžitá hodnota napětí mezi linkami	V
U_j	Jmenovité napětí	Ohm
v	Rychlost částice tekutiny	m/s
V	Objem tekutiny	m^3
x_0	Počátečný stav	–
x_a, b	Koeficienty ztráty tlaku u otvorů nádrže	–
X	Sada stavů FSM	–
X_{lr}	Přepočtená rozptylová reaktance rotoru	Ohm
X_{ls}	Rozptylová reaktance statoru	Ohm
X_m	Magnetizační reaktance	Ohm
Y	Merná energie čerpadla	J/kg
y	Průhyb tenzometru	m
z	poloha snímače p2 nad hladinou	m
$\alpha_{k1,2}$	Úhel zahnutí kolena	$^\circ$
η	Dynamická viskozita	$N/s.m^2$
η_e	účinnost čerpadla	–
ρ_0	Hustota tekutiny	kg/m^3
ω	Otáčky čerpadla	ot/min

12 SEZNAM PŘÍLOH

- Simulink MATLAB R2021b model hydraulického obvodu (hydraulický_obvod.xls)
- Matlab live skript pro načtení počátečních vstupních dat (matlab_live_script.mlx)
- Matlab skript pro generování frekvenčních analýz (matlab_FFT_script.m)
- Matlab pro spuštění paralelních simulací všech 126 nastavení hydraulického obvodu (matlab_parsim_script.mlx)