

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

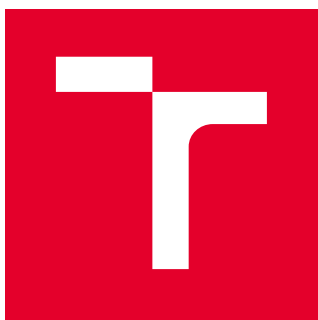
Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2020

Bc. Adam Kratochvíl





# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## ALGORITMUS PRO DETEKCI ÚNIKU MÉDIA Z POTRUBÍ

ALGORITHM FOR LEAKAGE DETECTION

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Adam Kratochvíl

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Stanislav Pikula, Ph.D.

BRNO 2020



# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Bc. Adam Kratochvíl

**ID:** 174557

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2019/20

**NÁZEV TÉMATU:**

## Algoritmus pro detekci úniku média z potrubí

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

- 1) Vypracujte literární rešerši metod použitelných pro detekci úniku média z potrubí pomocí analýzy deviací měřených signálů.
- 2) Určete podmínky nutné pro možnost určení směru úniku.
- 3) Vyberte vhodné metody, ty realizujte v prostředí Matlab a otestujte je na reálně změřených datech.
- 4) Realizujte algoritmus v jazyce C pro implementaci do průmyslového automatu (PLC) včetně optimalizace pro běh v reálném čase.
- 5) Ověřte správnou realizaci algoritmu v PLC pomocí dříve zaznamenaných testovacích dat.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Tian, C.H., Yan, J.C., Huang, J., Wang, Y., Kim, D.S. and Yi, T., 2012, July. Negative pressure wave based pipeline leak detection: Challenges and algorithms. In Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (pp. 372-376). IEEE.

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 1.6.2020

**Vedoucí práce:** Ing. Stanislav Pikula, Ph.D.

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**  
předseda oborové rady

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.



## **ABSTRAKT**

Práce se zabývá představením přehledu používaných metod pro detekci úniků stanovených technickými normami. Následně po analýze záznamu tlaku v potrubí navrhuje vlastní metodu, která vychází z existujících metod a využívá určení směru příchodu vlny přímo v měřicí stanici. Navržený koncept byl následně vytvořen v Matlabu, kde byla ověřena i jeho schopnost detekce. Celý algoritmus byl následně implementován do programovatelných automatů a byla mezi nimi navržena vhodná komunikace. Celé řešení bylo následně otestováno z pohledu funkčnosti.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Monitorování tlaku, detekce úniků, matlab, PLC

## **ABSTRACT**

The thesis deals with the presentation of an overview of the methods used for leak detection set by technical standards. Following the analysis of the pressure records from the pipeline, a new method is proposed, which is based on existing methods and uses the determination of the direction of arrival of the wave directly at the measurement station. The proposed concept was subsequently developed in Matlab, where the ability to detect was also verified. The whole algorithm was then implemented in programmable logic controllers and a suitable communication between them was designed. The entire solution was then tested in terms of functionality.)

## **KEYWORDS**

Pressure monitoring, leakage detection, matlab, PLC

KRATOCHVÍL, Adam. *Algoritmus pro detekci úniku média z potrubí*. Brno, Rok, 83 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce: Ing. Stanislav Píkula, Ph.D.





## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Algoritmus pro detekci úniku média z potrubí“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora



## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing.Stanislavu Pikulovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.



# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>17</b>
<b>1 Potrubní přeprava</b>	<b>19</b>
1.1 Normy . . . . .	19
1.2 Popis úniku . . . . .	21
1.3 Popis metod pro monitorování abnormalit . . . . .	22
1.3.1 Bilanční metody . . . . .	22
1.3.2 Přechodový model v reálném čase . . . . .	23
1.3.3 Monitorování tlaku nebo průtoku . . . . .	23
1.3.4 Vyhodnocování akustické/negativní tlakové vlny . . . . .	24
1.3.5 Statistická analýza . . . . .	25
<b>2 Návrh řešení</b>	<b>27</b>
2.1 Volba instrumentace . . . . .	28
2.2 Zdroj dat . . . . .	30
2.3 Podmínky pro určení směru . . . . .	30
2.4 Analýza signálu . . . . .	31
2.4.1 Analýza v časové oblasti . . . . .	32
2.4.2 Analýza ve frekvenční oblasti . . . . .	36
2.4.3 Analýza směru . . . . .	39
2.5 Návrh detekce úniků tlaku . . . . .	42
2.5.1 Detekce v časové oblasti . . . . .	42
2.5.2 Detekce ve frekvenční oblasti . . . . .	44
2.5.3 Detekce směru . . . . .	47
2.5.4 Vyhodnocení detekce . . . . .	48
<b>3 Realizace řešení</b>	<b>51</b>
3.1 Připojení snímačů tlaku . . . . .	51
3.2 Zdroj času . . . . .	52
3.3 Implementace algoritmu . . . . .	52
3.3.1 Detekce úniků . . . . .	53
3.4 Komunikace . . . . .	57
3.5 Centrální vyhodnocení úniků . . . . .	59
3.6 Výsledky detekce . . . . .	63
<b>Závěr</b>	<b>69</b>
<b>Literatura</b>	<b>71</b>

Seznam symbolů, veličin a zkratk	73
Seznam příloh	75
A Protokol o testovacích pokusech	77
B Výsledky detekce	79
C Obsah přiloženého archivu	83

# Seznam obrázků

1.1	Vývoj abnormality v čase . . . . .	22
2.1	Rumunsko - Signál ze snímače tlaku . . . . .	32
2.3	Rumunsko - Analýza v časové oblasti . . . . .	34
2.4	Původní signál . . . . .	35
2.4	Indie - Analýza v časové oblasti . . . . .	36
2.5	Rumunsko - Analýza ve frekvenční oblasti . . . . .	37
2.6	Rumunsko - Amplitudové charakteristiky . . . . .	38
2.6	Indie - Analýza ve frekvenční oblasti . . . . .	39
2.7	Analýza směru - určení distribuce . . . . .	40
2.8	Algoritmus pro vyhodnocení úniků v čase - detail . . . . .	43
2.9	Algoritmus pro vyhodnocení úniků v čase . . . . .	44
2.10	Rumunsko - Detekce úniků v čase . . . . .	45
2.11	Rumunsko - Detekce úniků ve frekvenční oblasti . . . . .	46
3.1	Detekce v měřící stanici . . . . .	54
3.2	Koncept komunikace . . . . .	59
3.3	Algoritmus centrální stanice komunikace . . . . .	62
3.4	Detekované úniky 25.04.2017 . . . . .	64
3.5	Detekované úniky 26.04.2017 . . . . .	66
3.6	Detekované úniky 27.04.2017 . . . . .	67





# Seznam tabulek

2.1	Porovnání použitých snímačů tlaku Wika [7] a Keller [8] . . . . .	28
2.2	Rumunsko - Umístění snímačů tlaku u jednotlivých stanic . . . . .	30
2.3	Rumunsko - Tabulka úniků pro referenční data ze dne 25.04.2017 . .	33
2.4	Rumunsko - Analýza směru stanice č.2 . . . . .	41
2.5	Parametry pro detekci dat v čase . . . . .	43
2.6	Parametry pro detekci dat ve frekvenční oblasti . . . . .	46
2.7	Detekce směru . . . . .	47
2.8	Výsledky detekce 25.4.2017 . . . . .	49
2.9	Výsledky detekce 26.4.2017 . . . . .	50
2.10	Výsledky detekce 27.4.2017 . . . . .	50
3.1	Centrální vyhodnocení 25.4.2017 . . . . .	65
3.2	Centrální vyhodnocení 26.4.2017 . . . . .	66
3.3	Centrální vyhodnocení 27.4.2017 . . . . .	67
B.1	Centrální vyhodnocení 25.4.2017 . . . . .	79
B.2	Centrální vyhodnocení 26.4.2017 . . . . .	80
B.3	Centrální vyhodnocení 27.4.2017 . . . . .	81



# Úvod

Žijeme v doposud nejrychleji měnící se době v celé historii lidstva. Populace se mnohonásobně zvětšila oproti začátku dvacátého století a my jsme nuceni začít využívat své zdroje efektivnějším způsobem. S tím ovšem souvisí i spousta dalších aspektů a jeden z nejvýznamnějších z nich je ekologie. Ekologická zodpovědnost nejen na straně velkých korporátních firem, ale i menších z nich a dokonce jedinců. Společnosti se snaží nejen předvídat možné ekologické dopady v důsledku jejich činnosti, ale hledají i efektivní cesty, jak se s těmito případnými selháními vyrovnat. Jedním z oborů lidské činnosti, ve kterém takovéto dopady mohou mít velice závažné, někdy dokonce fatální, následky, je i přeprava různých kapalin a plynů pomocí produktodů a potrubí. Roli zde samozřejmě hraje bezprostřední kontaminace zasaženého území, ale i fakt, že se tímto způsobem nejčastěji přepravují látky, které jsou hořlavé, toxické nebo dráždivé a je potřeba s nimi nakládat s maximální obezřetností. Havárie, které již se staly, nejen na našem území, měly obrovské ekologické následky pro celé oblasti. Finanční následky pro dané společnosti jsou také nezanedbatelnou položkou, protože pro společnost vyvstává i následná povinnost odstranění všech následků, které s havárií souvisejí. Díky této povinnosti se společnosti logicky snaží vyvarovat jakýchkoliv vzniků havárií a podobných událostí za každou cenu. Přes všechna opatření však takováto situace může nastat a v ten okamžik je potřeba v co nejkratším čase minimalizovat veškeré následky související s únikem. Případně může jít o událost způsobenou člověkem za účelem vlastního obohacení tedy krádeží daného produktu a poté je žádoucí, co nejdříve zjistit případný zdroj odcizení, aby byla následná finanční ztráta pro danou společnost co nejnižší.

Za tímto účelem vznikly nástroje, pomocí kterých je možné vyhodnocovat provozní stav potrubí na základě měření veličin za použití tomu odpovídajících snímačů a nástrojů. Tato práce se konkrétně zaměřuje na základní přehled existujících metod na základě norem platných pro tento obor. Dále se snaží navrhnout novou metodu, která bude vycházet z metod již existujících.



# 1 Potrubní přeprava

Potrubí jako nástroj pro přepravu materiálu byl poprvé použit už před více než 5000 lety ve starém Egyptě v podobě měděného potrubí, které se využívalo k přepravě čisté vody do měst. Od té doby byl tento nástroj použit i mnoha jinými národy [1]. V Číně se okolo 4. století př. n. l. začalo využívat bambusové potrubí k přepravě zemního plynu do měst, kde se využívalo pro ohřev a svícení.

Potrubní přeprava v takové podobě, jaké ji známe teď, se začala poprvé využívat po objevení praktického využití ropy jako paliva v 19. století ve státě Pensylvánie v Spojených státech amerických. Ropu bylo potřeba dále zpracovávat v jiných lokalitách, k čemuž se nejdříve využívala přeprava v sudech, které vezly koňské povozy, což představovalo velice nákladnou a pomalou formu dopravy. Jako levnou alternativu pro transport ropy z těžebních věží do rafinérií pro zpracování na naftu, petrolej, topné oleje nebo dehet se proto začalo využívat potrubí, která byla vytvořená ze dřeva.

Následný vznik automobilového průmyslu měl za následek výrazné zvýšení poptávky po benzínu a tedy i po přepravě a zpracování ropy, což vedlo k velkému rozšíření potrubní přepravy po celém území USA [2]. Od té doby se začala potrubí využívat i pro různá jiná média ve formě produktodů pro oleje, uhlovodíky nebo kondenzáty a navíc i pro plyny nebo v případě některých afrických nebo blízkovýchodních států i pro vodu.

S potřebou přenášet stále větší kvanta materiálu tak postupně docházelo i k navyšování průměru použitých potrubí, což vedlo ke vzniku rozsáhlejších katastrof. Z tohoto důvodu začaly vznikat nástroje pro detekci úniků. Prostá kontrola vnějšího pláště nebo hledání známek úniků podél potrubí bylo potřeba nahradit sofistikovanějšími metodami nejen proto, že se začala využívat neustále delší potrubí, ale také protože mohla vést těžko dostupným terénem nebo pod úrovní hladiny vody.

Kvůli tomu, že se ve většině států jedná o kritickou infrastrukturu, došlo postupem času k regulaci tohoto odvětví a to jak potrubní přepravy, tak i požadavků na systémy pro detekci úniků. Díky tomu začaly vznikat normy, které stanovily obecné principy pro tyto systémy a také to, jakých parametrů musejí dosahovat.

## 1.1 Normy

Ačkoliv se jedná o průmyslové odvětví, které je přísně hlídáno a kontrolováno z pohledu bezpečnosti, tak v současné době neexistují mezinárodní normy typu ISO, které by se zabývaly problematikou monitorování potrubí a následným vyhodnocováním abnormalit při jejich provozování. Zejména chybí mezinárodní normy, které by blíže specifikovaly tuto problematiku. Používanou praxí se ale stalo, že se pro tyto

účely používají normy od API<sup>1</sup>, které jsou doporučenou metodikou pro monitorování kapalin, ale lze je aplikovat na libovolné médium. Jedná se konkrétně o normu API RP 1130 – Computational Pipeline Monitoring for Liquids, ale využívají se i další normy, které už nejsou tak obecné nebo jsou platné jen v některé konkrétní zemi. Cílem normy API RP 1130 je kromě stanovení metodiky a terminologie i popsání metod, které se používají za účelem zlepšení schopnosti monitorovat a detekovat hydraulické abnormality v potrubích.

Tato norma stanovuje následující pojmy:

- Citlivost - rychlost jakou je možné detekovat vznik abnormality
- Spolehlivost - potlačení falešně vyvolaných alarmů a detekce těch skutečných
- Přesnost - přesnost s jakou je možné určit místo vzniku abnormality
- Robustnost - odolnost při nestandardním stavu potrubí (např. poruchy měření)

Všechny tyto metody jsou založené na použití vyhodnocovacích jednotek, které budou zpracovávat data získaná z dějů probíhajících uvnitř potrubí. Kvůli tomu jsou z této normy vyloučené metody, které pro monitorování využívají snímkování dané oblasti (ať už pomocí dronu, letadla nebo satelitu), pravidelnou kontrolu hlídkou nebo i kontrolu odchylky průtoku nebo tlaku operátorem provozu v kontrolní místnosti bez použití dodatečných výpočetních zařízení. Dále nezohledňuje metody, které měří vlastnosti na vnější straně potrubí a/nebo v jeho okolí a vyhodnocují jen lokální projevy úniku média mimo potrubí. Mezi tyto metody se řadí detekce pomocí optických kabelů (měření tlaku v okolí potrubí nebo přímé měření koncentrace uhlovodíků), akustické detektory (měření vibrací na vnější straně potrubí nebo detekce akustických projevů při narušení potrubí) a snímače pro detekci vypařených uhlovodíků ve vzduchu.

Metody pro monitorování potrubí splňující normu API RP 1130 jsou následující[3]:

- Bilanční metody
- Přechodový model v reálném čase (RTTM<sup>2</sup>)
- Monitorování tlaku nebo průtoku
- Vyhodnocování akustické/negativní tlakové vlny
- Statistická analýza

Pro splnění této normy je tedy nutné využít některou z těchto metod a navíc je potřeba dosáhnout i určité úrovně citlivosti, spolehlivosti, přesnosti a robustnosti při testování konkrétní metody v reálném provozu.

---

<sup>1</sup>American Petroleum Institut - Organizace vydávající normy pro těžbu, zpracování ropy a petrochemický průmysl

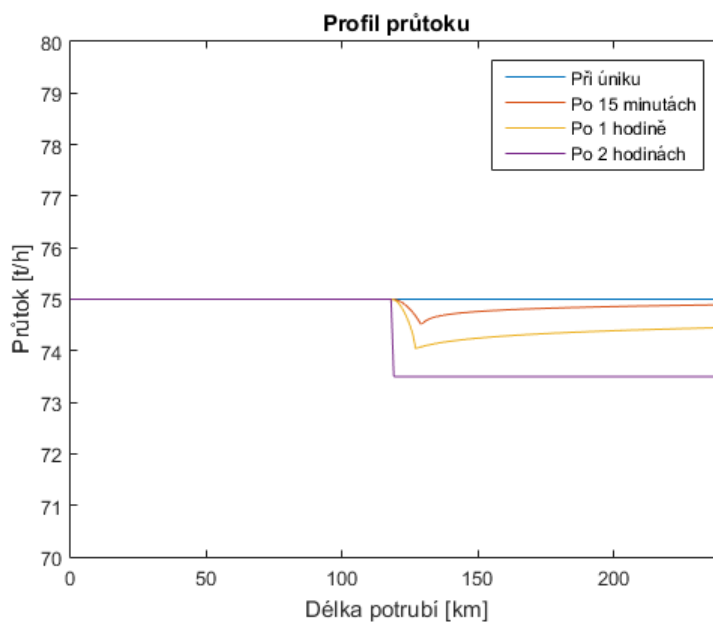
<sup>2</sup>Real Time Transient Model

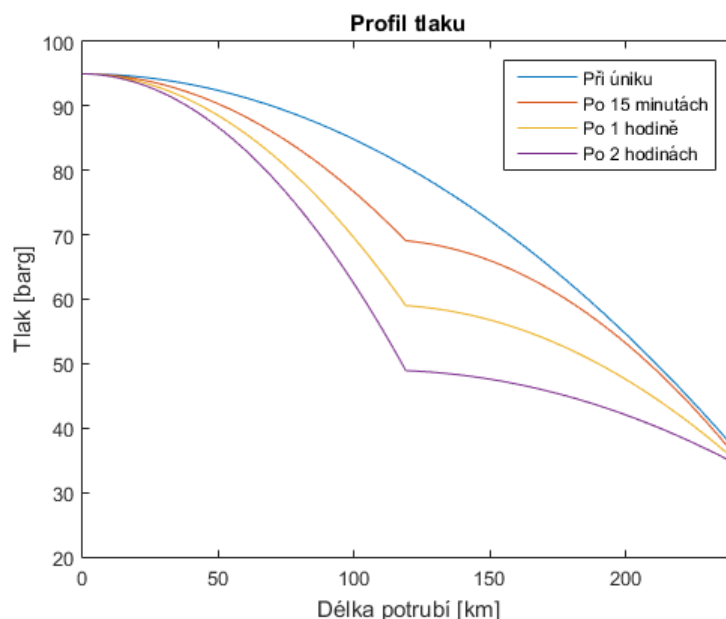
## 1.2 Popis úniku

K úniku může dojít v důsledku několika důvodů. Nejčastějším důvodem je únava materiálu nebo vznik koroze, kdy v důsledku tlaku při přepravě a typu přepravovaného média může dojít ke vzniku prasklin vlivem vnitřních sil a nebo chemickou reakcí média, která má za následek zkrěhnutí potrubí. Častým důvodem je i působení externích zdrojů.

Při úniku dojde k ovlivnění provozního stavu v závislosti na velikosti průrazu s následným únikem protékajícího média do vnějšího prostředí. V důsledku rozdílného tlaku uvnitř a vně potrubí dojde k vyrovnání těchto tlaků. Pokud je tlak uvnitř potrubí větší než vně, dojde k vytvoření tlakové vlny, která se od daného místa bude šířit potrubím rychlostí zvuku pro dané médium.

Následně, v důsledku unikání média do vnějšího prostředí dojde k bilanční nerovnováze průtoku a současně podle zákona hydrodynamiky nastane i pokles tlaku oproti úrovni před vznikem abnormality. Ideální průběh úniku z pohledu tlaku a průtoku lze vidět na Obr. 1.1.





Obr. 1.1: Vývoj provozních vlastností v průběhu času [4]

## 1.3 Popis metod pro monitorování abnormalit

### 1.3.1 Bilanční metody

Do této kategorie se řadí metody hmotnostní a objemové bilance. Obě využívají zákon o zachování hmoty, kdy pro každý úsek potrubí, který neobsahuje žádné odbočky, platí, že množství nebo objem média, který na začátku tohoto úseku do potrubí vstoupí, musí odpovídat množství, které se v daném potrubí nachází nebo které na konci daného úseku potrubí opustí. Za tímto účelem se na začátku a na konci měřeného úseku instalují hmotnostní nebo objemové průtokoměry. Tato metoda předpokládá konstantní nebo alespoň známou hodnotu hustoty média v monitorovaném úseku pro případ hmotnostní bilance a známé průměry potrubí v místech měření v případě obou metod. Díky tomu lze v kombinaci s měřením teploty a tlaku vypočítat předpokládané množství/objem média v daném úseku. Bilanční metody následně porovnávají hmotnost/objem v daném úseku získaný ze snímačů průtoku s předpokládanou hmotností/objemem. Pokud je rozdíl větší než pevně stanovená prahová hodnota, dojde k vyhlášení alarmového stavu.

Výhodou této metody je její jednoduchá a rychlá implementace, která typicky nevyžaduje speciální instrumentaci, dále také nejsou kladeny výjimečné požadavky na výpočetní výkon. Tato metoda je schopná monitorovat i potrubí, ve kterých neprobíhá přeprava média za pomoci čerpadel ale jen samospádem. Nevýhodou představuje



potřeba většího množství snímačů průtoku v tom případě, že jsou na monitorovaném úseku odbočky potrubí. Další nevýhodu představuje dlouhá prodleva před tím, než je tato metoda schopna detekovat abnormalitu v průtoku média potrubím. To je dáno tím, že tento jev je detekován až na průtokoměru, který se nachází v místě, kdy médium opouští monitorovaný úsek.

### 1.3.2 Přechodový model v reálném čase

Jedná se o jednu z modernějších metod vzhledem k použitým technologiím. Tato metoda využívá měření všech provozních parametrů za pomoci snímačů tlaku, teploty, hustoty a průtoku v různých částech měřeného úseku. Ty kombinuje se znalostmi všech parametrů potrubí jako jsou např. délka, průměr, tloušťka, topologie, typy čerpadel, stavy ventilů, atd. Díky tomu lze vytvořit přesný, v reálném čase aktualizovaný model potrubí, který bude v ideálním případě odpovídat provozním hodnotám měřených v daném úseku. Následně se využívá několik různých přístupů. Prvním je využití zákona o zachování hmoty, zákona o zachování hybnosti a zákona o zachování energie, díky čemuž lze ze všech provozních stavů vypočítat průtok v měřené části potrubí, který lze následně porovnat s hodnotou získanou z průtokoměru a tím případně detekovat deviaci průtoku. Druhým přístupem je hledání předem stanovených vzorů v datech, která jsou ze všech snímačů získána. K tomuto účelu se používají Neuronové sítě, kdy je cílem porovnávání provozních dat ze snímačů vůči různým vzorům, které popisují výskyty abnormalit a následným hledáním jejich korelací. Jedná se o jednu z nejlepších metod pro monitorování potrubí, především díky schopnosti správně fungovat i pokud nedochází k přepravě média a i vzhledem k rychlosti s jakou je tato metoda schopna detekovat abnormalitu. Dále tato metoda kromě detekce abnormality umožňuje určit i místo jejího vzniku. Tato metoda má ale i své nevýhody a to především finanční a časovou náročnost, kdy ke své funkčnosti vyžaduje velké množství snímačů umístěných na mnoha místech potrubí. Uvádí se i velké nároky na výpočetní výkon a vzhledem k centrálnímu zpracování dat i vysoké požadavky na komunikaci (pro přenášení dat ze všech snímačů). V neposlední řadě jsou metody založené na tomto principu i velice časově náročné na odladění, protože je nutné vždy znovu vytvořit model, který bude odpovídat konkrétní dané aplikaci.

### 1.3.3 Monitorování tlaku nebo průtoku

Tato metoda využívá měření tlaku nebo průtoku za pomoci tomu odpovídajících snímačů umístěných průběžně na měřeném úseku potrubí. Údaje z jednotlivých snímačů jsou vyhodnocovány individuálně s cílem detekce prudkého poklesu tlaku nebo průtoku, který by odpovídal abnormalitě oproti běžnému provozu. Jedná se o nejjednodušší metodu pro monitorování, která byla vytvořena jako náhrada sledování

provozu pracovníky dané organizace.

Při porovnání s ostatními metodami jim co do přesnosti a spolehlivosti nemůže konkurovat. Výhodou této metody je její jednoduchost, kdy pro každé měřicí místo stačí snímač tlaku nebo průtoku a zařízení, které tato data vyhodnotí. Dále je schopná velice rychle detekovat nastalou abnormalitu. Mezi hlavní nevýhody patří malá přesnost, obzvláště v případě monitorování průtoku (média se při malém úniku z potrubí ustálí na nové hodnotě průtoku) a to, že pomocí této metody je možné určit jen zdali došlo k úniku, ale už nelze určit přesné místo vzniku. Další nevýhodou může být velká chybovost v důsledku toho, že údaj o vzniku abnormality pochází jen z jednoho měřicího bodu.

Pro snížení chybovosti se u této metody při vyhodnocování zohledňují i měřicí body, které se nacházejí v okolí konkrétního bodu, u kterého došlo k detekci abnormality nejdříve. Tato metoda potom vyhlásí abnormalitu až poté, co došlo k potvrzení některým dalším měřicím bodem. Tím dojde ke snížení chybovosti ale současně i citlivosti detekce, protože změna tlaku a průtoku vyvolaná únikem z potrubí, musí být už v místě úniku větší, aby byla detekovatelná vzdálenějšími měřicími body.

### 1.3.4 Vyhodnocování akustické/negativní tlakové vlny

Podobně jako tomu bylo u předchozí metody, je i tato založená na snímání tlaku. Zde je navíc potřeba použití snímačů s vysokou vzorkovací frekvencí. Ty jsou umístěny ve stanovených vzdálenostech podél trasy potrubí. Každý ze snímačů bývá typicky zapojen do lokální měřicí stanice, kde může dojít k prvotnímu zpracování dat a k jeho sběru. Následně za určitý časový úsek jsou data hromadně přenesena do centrální stanice, kde dojde k celkovému vyhodnocení.

Cílem metody je detekovat přechodové děje vzniklé v důsledku úniku v podobě akustické a negativní tlakové vlny. Akustická vlna při průchodu měřicím místem způsobuje velmi prudký nárůst tlaku, ale jen po krátkou dobu. Negativní tlakovou vlnou se nazývá následek průchodu akustické vlny, kdy dojde k poklesu tlaku pod úroveň, na jaké se nacházel tlak před akustickou vlnou. Při negativní tlakové vlně sice není pokles tak velký, ale má delší časový průběh. Jednotlivé měřicí body mohou tedy monitorovat signál tlaku a snažit se detekovat jednu nebo druhou vlnu, nebo mohou sloužit jen pro sběr dat. Při následném centrálním zpracování dat je nutné vyhodnocovat data ze všech měřicích míst a hledat mezi nimi souvislost. Vzhledem k tomu, že tato metoda využívá pouze hodnoty tlaku a neobsahuje žádný dodatečný nástroj pro odstranění šumu v datech, je hlavní část metody tvořena použitím vhodného filtru, který umožní nalezení úniků. K tomuto účelu se používají filtrování založená na ARMA, waveletových transformacích a další [5]. Další rozdíl představuje to, že kromě samotné detekce umožňuje tato metoda i přesné určení místa úniku.

To je možné díky centrálnímu vyhodnocení všech dat, kdy při detekci úniku pomocí alespoň dvou měřících stanic ve známé vzdálenosti, je možné stanovit místo vzniku dané vlny. Vícenásobné potvrzení několika nezávislými stanicemi navíc i zvyšuje spolehlivost této metody oproti prostému měření tlaku.

Jednotlivé měřící body mohou monitorovat tlak a snažit se detekovat jeho prudký nárůst, který odpovídá průchodu akustické tlakové vlny v daném místě a/nebo pátrat po výrazném poklesu tlaku, indikujícím negativní tlakovou vlnu.

Na rozdíl od předešlé má tato metoda nižší citlivost a je náročnější na množství zařízení pro zpracování dat, ale tyto nevýhody jsou kompenzovány možností přesně určit místo vzniku anomálie a vysokou spolehlivostí. Navíc vykazuje velmi krátkou prodlevu mezi vznikem abnormality a jejím detekováním.

### **1.3.5 Statistická analýza**

Poslední metoda volí statistický přístup, který vychází z teorie rozhodování [6]. V závislosti na trendech měřených veličin tlaku a/nebo průtoku jsou vyhodnocovány pravděpodobnosti vzniku anomálie a současně i toho, že se jedná o normální stav. Samotné vyhodnocení spočívá v následném zhodnocování vzniklých hypotéz, které musí dosáhnout nějaké meze.

Pro vytvoření těchto vzorů není potřeba vytvářet modely potrubí na základě rozsáhlých historických dat jako je tomu u RTTM. Při vyhodnocování se mohou použít např. průměrná hodnota a rozptyl při běžném provozu. Vznik abnormality je poté vyhodnocován jako odchylka od těchto hodnot, která přetrvá po definovanou dobu. Tato metoda se v současnosti v praxi moc nevyužívá, ale do budoucna se jedná o metodu s největším potenciálem pro dosažení nejlepších možných výsledků.



## 2 Návrh řešení

Cílem této práce je zkombinovat existující metody pro monitorování tlaku a vyhodnocení negativní tlakové vlny za účelem navrhnutí nové metody, která by využívala výhod z obou těchto metod. Tím bychom dostali systém, který bude schopen spolehlivě monitorovat vznik tlakových abnormalit a navíc také určit místo jejich vzniku. Tyto metody byly zvoleny především z toho důvodu, že dosahují velké citlivosti, tj. jsou schopné detekovat i abnormality vzniklé při drobném narušení vnějšího pláště potrubí. Dále umožňují provést rychlé vyhodnocení vzniklého úniku, protože vyhodnocují pokles tlaku, ke kterému dojde v důsledku průchodu tlakové vlny, která se šíří potrubím rychlostí zvuku v daném médiu. Posledním pozitivem je, že ke své správné funkčnosti potřebují jen běžně dostupné snímače tlaku. Díky tomu lze obě metody poměrně snadno implementovat.

Metody mají samozřejmě i své nevýhody, mezi které patří především to, že jsou schopné detekovat pouze v případě, že je potrubí v dynamickém stavu, tj. stav kdy je v potrubí zvýšená úroveň tlaku za pomoci chodu čerpadel, která odpovídá tlaku potřebnému pro transport média. Tudíž v okamžiku, kdy dojde k poklesu tlaku pod určitou úroveň, je energie tlakové vlny tak nízká, že ji není možné detekovat a tím pádem nerozlišitelná od okolního šumu. V důsledku toho tedy není možné detekovat vznik abnormalit v tzv. statickém stavu, kdy čerpadla jsou zastavena a tlak v potrubí není dostatečný pro transport média. Dále je nutné, vzhledem ke správné funkčnosti těchto metod, umístění měřících stanic v pravidelných vzdálenostech podél potrubí. Tato vzdálenost je navíc velmi závislá na druhu přepravovaného média a plánovaném provozním tlaku, při kterém se bude provádět přeprava média daná především výškovým profilem terénu kudy potrubí povede.

Obě metody pro měření tlakové vlny vyžadují, aby deviace tlaku vzniklá abnormalitou měla takovou počáteční sílu, díky které by ji bylo možné zaznamenat pomocí několika měřících bodů. Každý měřící bod využívá pro každé potrubí (může být současně monitorováno větší množství potrubí najednou) jen jeden snímač tlaku. Z tohoto důvodu je tedy nutné mít měřící body v menších vzdálenostech od sebe, aby bylo možné zachytit i abnormality s menší počáteční energií.

Navrhované řešení spočívá v tom, že by byl tlak vyhodnocován pomocí dvojice snímačů tlaku připojeného do jednotky pro sběr a vyhodnocení dat v daném měřícím bodu. Následně by bylo možné provést vyhodnocení tlaku i místně, tak jako tomu je v případě monitorování tlaku, ale využila by se k tomu dvojice snímačů tlaku, které by bylo možné použít pro zvýšení spolehlivosti detekce a také pro určení směru šíření tlakové vlny. Díky tomu by bylo možné zvýšit maximální vzdálenost mezi jednotlivými měřícími body bez snížení citlivosti a spolehlivosti detekce nebo při zachování stejné vzdálenosti mezi stanicemi dosáhnout výrazně větší spolehlivosti.

K tomu, aby bylo možné tohoto dosáhnout, je potřeba zvolit takovou instrumentaci, která toto umožňuje.

## 2.1 Volba instrumentace

Vzhledem k tomu, že schopnost detekovat abnormality pomocí navrhované metody je závislá na kvalitě měřených dat, je potřeba pro měření zvolit takovou instrumentaci a nástroje na následné zpracování dat, kterými bude možné získat co nejlepší výsledky. V tomto konkrétním případě jsou k dispozici dvě sady dat, které byly zaznamenány pomocí snímačů tlaku od různých výrobců a i následné zpracování je řešeno rozdílně. První řešení je realizováno za pomoci snímače tlaku Wika IS-20-S, seznam parametrů je v tabulce 2.1.

Výrobce	Wika	Keller
Model	IS-20-F	33 X
Rozsah [bar]	0..25	0..100
Výstupní signál	4..20 mA, 2-wire	CANopen, 5-wire
Časová odezva [ms]	$\leq 1$	1
Citlivost [% z rozsahu]	$\leq 0.1$	0,002

Tab. 2.1: Porovnání použitých snímačů tlaku Wika [7] a Keller [8]

Druhé řešení využívá snímač tlaku Keller 33-X. Prvním faktorem pro výběr těchto konkrétních snímačů tlaku byla existence jejich provedení do výbušného prostředí. A to právě z důvodů toho, že se jako médium nejčastěji používají hořlavé látky (např. ropa, zemní plyn, deriváty uhlovodíků, apod.). Wika IS-20-S je výrobcem doporučena pro použití v různých průmyslových odvětvích včetně chemického, petrochemického i při zpracování ropy a plynu a má potřebné certifikáty pro nasazení ve výbušném prostředí při použití provedení Ex ia<sup>1</sup>. Druhý snímač tlaku od společnosti Keller je dostupný v provedeních Ex ia a Ex d<sup>2</sup>. Obě varianty představují běžně používané ochrany pro nasazení do výbušného prostředí, ale v případě Ex ia je pro naše účely nezbytné počítat s nutností použití oddělovací bariéry do

<sup>1</sup>Intrinsic Safety – Jiskrově bezpečné - Dochází k omezení energie, která prochází kabeláží a samotným zařízením, čímž zamezuje vzniku vznícení nebo zahřátí.

<sup>2</sup>Flameproof – Pevný závěr - Zařízení je schopné odolat explozi uvnitř jeho pouzdra, aniž by došlo k jeho poškození a k zapálení vnějšího hořlavého prostředí.

měřicí smyčky, která bude představovat další zdroj rušení signálu. Přesto se používá, především protože dovoluje zapojení snímačů i na dlouhé vzdálenosti a jedná se o levnější řešení z pohledu nákladů.

Nejdůležitějším faktorem při výběru snímače je jeho citlivost. Především protože se při monitorování vyhodnocuje okamžitá změna tlaku, takže čím menší změnu tlaku je možné změřit, tím citlivější bude i detekce a následně bude možné detekovat i malé abnormality. Kvůli tomu je potřeba, aby nejnižší detekovaná hodnota měřené veličiny snímače byla co nejmenší. Díky tomu bude možné detekovat menší tlakové deviace, které jsou vyvolané v důsledku úniku otvorem o malém průměru (řádově desítky mm), podle konvencí využívaných v praxi.

Poslední faktorem při výběru instrumentace a v tomto případě i následného zpracování dat je způsob, jakým bude se snímačem tlaku probíhat komunikace. Snímač Wika využívá proudovou smyčku  $0 - 20 \text{ mA}$ , kterou je potřeba doplnit i vhodným A/D převodníkem. Ten musí mít stejnou nebo lepší přesnost, než jaké dosahoval snímač tlaku a převodní čas dostatečně malý, aby nepřevyšoval časovou odezvu snímače. Data, která byla naměřena pomocí tohoto snímače, využila pro zpracování PLC od B&R Automation s analogovým modulem X20AI2632, který obsahuje 15-bitový A/D převodník (pro stanovený rozsah  $0..25 \text{ bar}$ , tedy dosahuje teoretické citlivosti  $\approx 0,763 \text{ mbar}$ ) a převodní čas  $50 \mu\text{s}$  pro všechny vstupy. V případě použití proudové smyčky navíc musíme počítat s tím, že měřený signál může být zatížen dodatečnou chybou vzniklou působením externích vlivů na spojovací kabely. Typickým příkladem je vytvoření rušení o síťové frekvenci  $50 \text{ Hz}$  nebo jejích násobcích. Alternativní variantou je použití snímačů, které jsou vybaveny některým z komunikačních protokolů. Pro tuto práci byl zvolen konkrétně protokol CANopen. Snímače, které využívají digitální komunikaci jsou zpravidla vybaveny mikroprocesory, které provádí převod tlaku do digitální podoby pomocí A/D převodníku, dále jsou schopné provádět základní početní operace pro kompenzaci vnějších vlivů (typicky teploty) a případných nelinearit při měření a jsou schopny komunikovat pomocí daného komunikačního protokolu. Vlastnosti snímače tedy budou záležet i na A/D převodníku, který daný snímač používá. V případě snímačů od společnosti Keller se jedná o 16-bitový A/D převodník. Díky tomu, že zpracování vstupního signálu je prováděno přímo v daném snímači tlaku a dále už probíhá komunikace výhradně digitálně, nemůže dojít ke vzniku dodatečné chyby působením externích vlivů na komunikační kabely.

Záměrně bylo vynecháno řešení, které kombinuje obě předešlé varianty v podobě protokolu HART, který využívá jak proudovou smyčku  $4 - 20 \text{ mA}$ , tak i digitální komunikaci. Důvodem k jejich vyloučení pro tuto aplikaci je jejich typická doba odezvy, která je nejméně  $25 \text{ ms}$  a to by znamenalo zhoršilo detekování úniků a v případě určení směru, by to znamenalo, mít větší vzdálenost mezi umístěním snímačů tlaku.

## 2.2 Zdroj dat

Za účelem analýzy a následné detekce abnormalit byly získány dvě sady různých dat. První sada dat pochází z ropovodu v Rumunsku a obsahuje záznam ze dvou stanic, kde na každé stanici byla umístěna dvojice snímačů tlaku. Zde jsou zaznamenána data o skutečných provozních parametrech daného potrubí během několika různých stavů zaznamenaných mezi dny 25. až 27. dubna 2017. Konkrétně se jedná o data z měřicí stanice č.2 na počátku potrubí, tj. na 0 *km* potrubí. Dále jsou k dispozici data ze stanice č.3, která je umístěná na 67,087 *km*. Umístění jednotlivých snímačů je v tabulce 2.2. Tomu tedy odpovídají vzdálenosti mezi snímači pro stanici S02 22,7 *m* a pro stanici S03 15,7 *m*. K těmto datům je k dispozici i záznam z provedených testovacích úniků, který lze nalézt v Příloze A. Pro záznam hodnot tlaku byly použity snímače tlaku Keller 33 X viz. 2.1, kde jsou parametry i pro snímač z druhé sady.

Stanice	Snímač tlaku	Vzdálenost [m]
č.2	S02P1	1
	S02P2	24
č.3	S03P1	67087
	S03P2	67103

Tab. 2.2: Rumunsko - Umístění snímačů tlaku u jednotlivých stanic

Druhá sada dat pochází z ropovodu v Indii. Stejně jako v předešlém případě je použita konfigurace se dvěma měřicími stanicemi, které jsou umístěny na začátku a konci daného úseku potrubí o délce 12,5 *km*. Vzdálenosti mezi snímači tlaku jsou v tomto případě na obou stanicích 15 metrů. Jako snímače tlaku jsou použity WIKA IS-20-F, které jsou dále doplněny o Ex-i oddělovací bariéru Pepperl-Fuch KFD2-STC4-Ex1. Ty jsou následně zapojeny do modulu analogových vstupů od B&R Automation X20AI2632. V tomto případě není k dispozici protokol o testovacích únicích, protože se zde žádné úniky nevyskytují. Jedná se o běžný provozní stav daného potrubí, kdy pravidelně dochází ke spouštění čerpadel za účelem navýšení potřebného průtoku pro přepravu média. Průběhy těchto dějů jsou ale velmi podobné průběhům při testovacím úniku, jediný rozdíl bude představovat místo vzniku, které bude odkazovat na polohu čerpadel, jež se nacházejí mimo měřený úsek.

## 2.3 Podmínky pro určení směru

Určení směru bude závislé na několika faktorech. Patří sem typ média, které je potrubím přepravované. V závislosti na typu média se mění rychlost šíření tlakové



vlny v potrubí. Neméně důležitým faktorem je časová odezva použitého snímače tlaku. Snímače s vysokou vzorkovací frekvencí budou mít větší pravděpodobnost, že zachytí směr vzniku přechodového děje, který vznikl v důsledku úniku. Předpokládaná vzdálenost mezi snímači by měla být na hranici schopnosti spolehlivě detekovat směr příchodu vlny v daném měřicím bodě. Samotná vzdálenost od úniku bude dána rychlostí šíření zvuku v daném médiu, vyhodnocováním hodnot měřeného tlaku měřicí jednotkou a v neposlední řadě možnostmi osazení snímače tlaku stanovených vlastníkem daného potrubí. Pro oba soubory s daty byly použity snímače tlaku se vzorkovací frekvencí 1000 Hz. Navíc se v obou případech jednalo o ropovody, čemuž odpovídá rychlost šíření zvuku 1200 – 1500 m/s [9] v závislosti na konkrétním typu ropy. Vliv rychlosti šíření vlny je na typu přepravovaného média velmi závislý, protože například pro zemní plyn už se jedná o rychlost 450 m/s [10]. Pokud budeme předpokládat rychlost na spodní hranici rozsahu, tak v případě stanice č.2 by tlaková vlna urazila vzdálenost mezi snímači za 18,9 ms a v případě stanice č.3 za 13,0 ms. Tomu odpovídá, že daný snímač by měl zachytit 18 resp. 13 vzorků dat, než bude možné danou vlnu zaznamenat i pomocí druhého snímače.

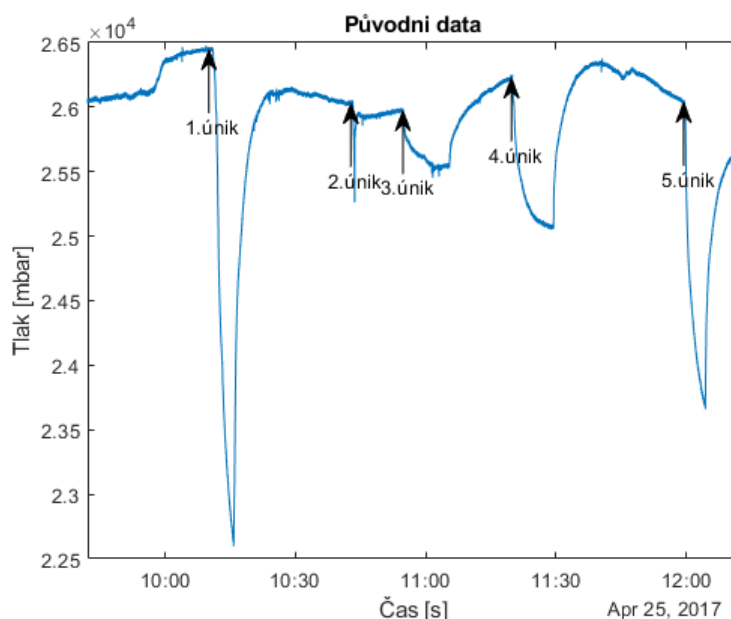
## 2.4 Analýza signálu

Pro nalezení nejvhodnější metody k analýze získaných dat použijeme běžně používané nástroje pro práci v časové a frekvenční oblasti. Hlavním důvodem pro jejich nasazení je jednoduchost a optimalizace algoritmů, tudíž tyto metody nejsou tolik náročné na výkon. Případná implementace do měřicí stanice založené na programovatelném automatu (PLC), by byla možná pomocí již implementovaných funkcí a nevyžadovala by zvláštní nároky na výkon. Pro analýzu signálu byla jako reprezentativní vzorek v případě dat z Rumunska použita data ze dne 25.dubna 2017 od 09:42:10, která byla zaznamenávána po dobu 150 minut. Vzhledem k tomu, že je naším cílem zjistit projevy přechodových dějů při vzniku abnormalit, bude dostačující využívat k tomuto účelu data pouze z jednoho ze snímačů tlaků. Pro tento účel byl zvolen první snímač na stanici č.2. Tento reprezentativní vzorek byl zvolen proto, že obsahuje 5 rozdílných pokusných úniků, které byly provedeny v blízkosti zvolené stanice.

V případě signálů z Indie byla jako reprezentativní vzorek použita data ze dne 10.ledna 2019 od 7:56:57, která byla zaznamenána po dobu 13 hodin. V tomto případě se jedná o data z první stanice a prvního snímače tlaku. V obou případech byla data vzorkována při frekvenci 1000 Hz.

## 2.4.1 Analýza v časové oblasti

Jako referenční data byla použita data pocházející z ropovodu v Rumunsku ze dne 25.04.2017 ze stanice číslo 2 a snímač S02P1 viz. 2.1. Výběr tohoto konkrétního úseku dat je z toho důvodu, že obsahuje několik testovacích úniků, které byly provedeny v blízkosti dané stanice a tím je lze snadno identifikovat. Jak vyplývá z protokolu o pokusech, tak nejprve došlo na druhé stanici k otevření 2 palcového ventilu o čtvrtinu. Následně už byly provedeny testovací úniky na 4377 m potrubí. Samotný únik byl proveden za pomoci ventilu na kterém byly nasazeny redukce, čímž bylo možné simulovat pokusné úniky o různých průměrech. V tomto konkrétním případě se jedná o průměry 4, 7, 10 a 20 mm. Všechny tyto události jsou patrné na zobrazených datech v časové oblasti. Popis zkušebních úniků pro zvolená referenční data je v tabulce 2.3. Daný signál byl zvolen jako referenční z důvodu absence velkých skoků tlaku, a také proto, že je zde obsaženo několik různých testovacích úniků o různých parametrech.



Obr. 2.1: Rumunsko - Signál ze snímače tlaku ze dne 25.04.2017 9:42 - 12:12

Pro vyhodnocení signálu v časové oblasti byla použita diference dané datové řady o  $n$  vzorcích. Matematicky zápis této operace je následovný

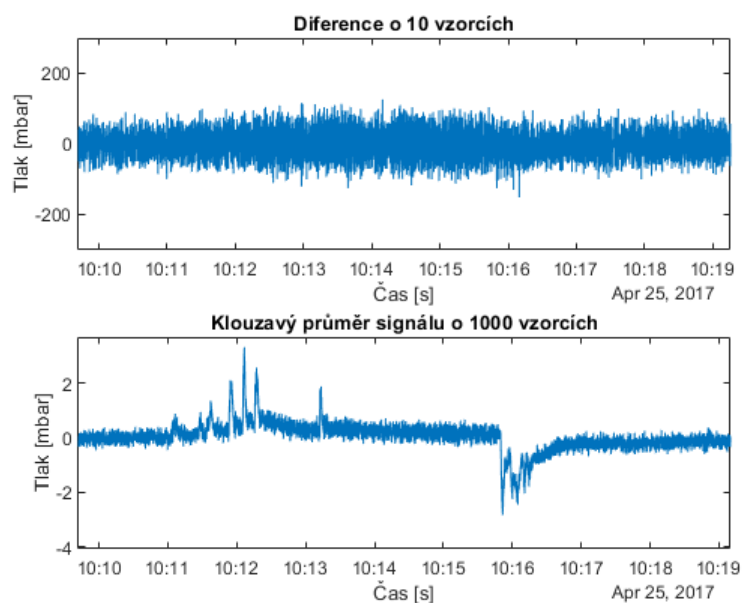
$$dif = x_1 + x_2 + \dots + x_{\frac{n}{2}} - x_{\frac{n}{2}+1} - \dots - x_n = \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} x_i - \sum_{j=\frac{n}{2}+1}^n x_j \quad (2.1)$$

Na základě této operace byly získány následující grafy 2.3, na nichž je patrné, že s rostoucím počtem vzorků použitých pro diferenci roste zesílení analyzovaného sig-

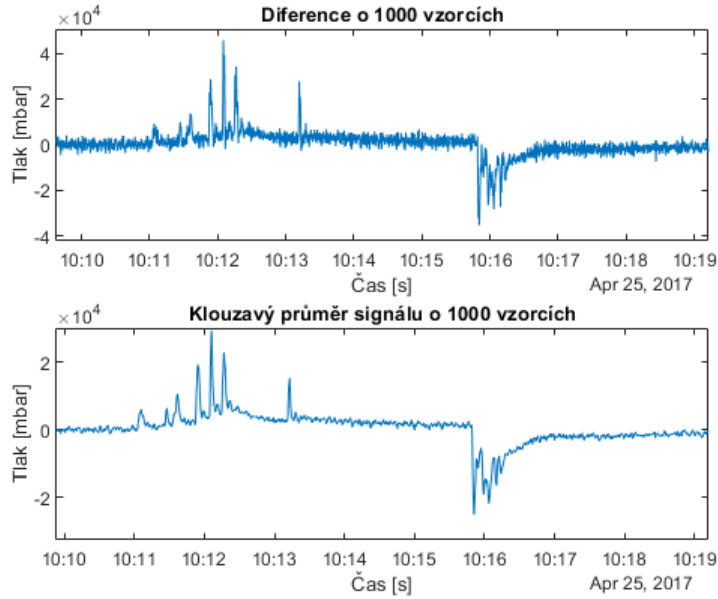
Čas [s]	Průměr úniku [mm]	Vzdálenost [m]	Doba trvání [min]
1670	otevření o 1/4 ventilu 2"	0	5
3632	20	4377	2
4353	4	4377	10
5852	7	4377	10
8233	10	4377	5

Tab. 2.3: Rumunsko - Tabulka úniků pro referenční data ze dne 25.04.2017

nálu nesoucí informace o změnách tlaku i okolního šumu. Nevýhodou tohoto přístupu je to, že vytváříme zpoždění o daný počet vzorků. Pokud ale bude použito stejné zpoždění pro všechny signály, nevznikne žádná chyba při detekci a navíc vzniklé zpoždění při vyhodnocování je zanedbatelné, protože nejrychlejší systémy pro detekci jsou schopné vyhodnotit únik v řádu jednotek až desítek minut.



(a) Diference o 10 vzorcích

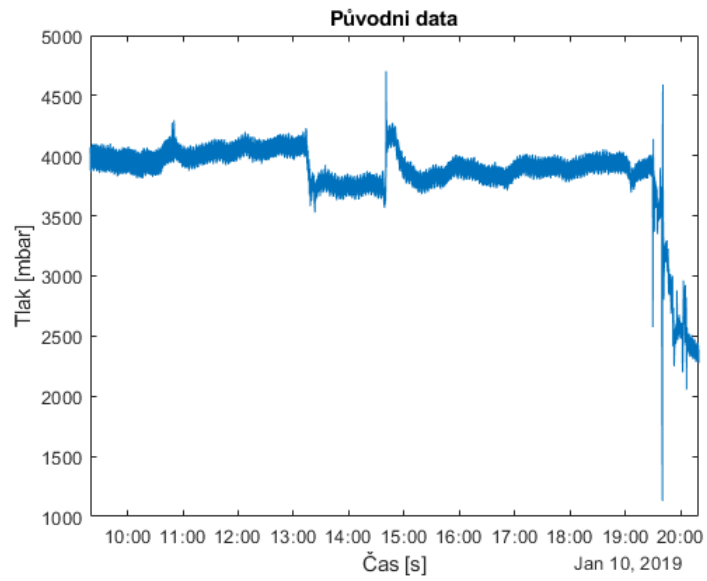


(a) Diference o 1000 vzorcích

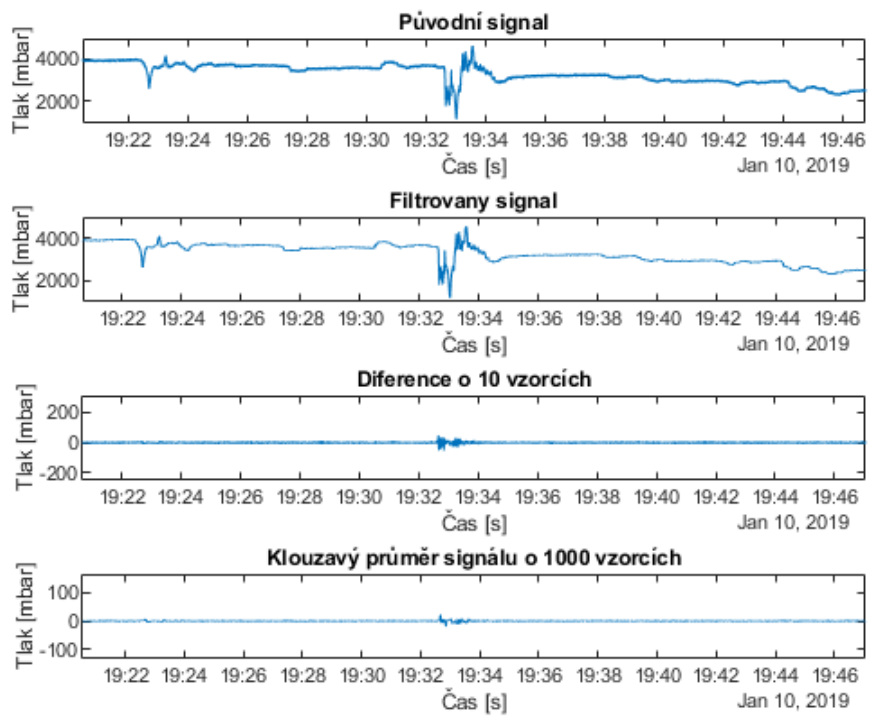
Obr. 2.3: Rumunsko - detail 1. úniku - diference o a)10 vzorcích a b)1000 vzorcích

Z grafu je patrné, že s rostoucím počtem vzorků použitých pro diferenci dochází k zvětšování odstupu žádaného signálu od šumu. Při volbě alespoň stovek vzorků už je možné určit jednotlivé úniky z referenčního signálu. Nevýhodou je, že náročnost této operace na výkon významně roste s použitým vyšším počtem vzorků. Při následném použití plovoucího průměru na získanou diferenci je patrné vyhlazení průběhu signálu. V závislosti na počtu použitých vzorků pro výpočet diference dochází k postupnému odstranění rychlých přechodových dějů a s rostoucím počtem už výsledek odpovídá spojnici trendu tlaku.

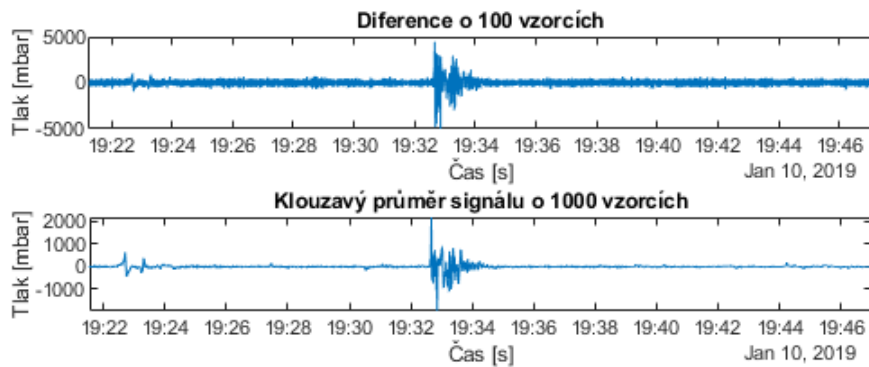
V případě dat z ropovodu v Indii je patrné, že signál obsahuje velké množství šumu, který vznikl působením síťové frekvence na proudovou smyčku. To bude blíže ukázáno při analýze ve frekvenční oblasti. Pro odstranění tohoto rušení byl na vstupní signál použit IIR Butterworthův filtr 5. řádu typu spodní propust, kterým došlo k odstranění šumu tak, jak je vidět na obr. 2.4. Tento typ filtru byl zvolen především pro jeho jednoduchost a malou výpočetní náročnost. Na datech byla podobně jako v předešlém případě použita diference pro lepší zobrazení změny tlaku. Na rozdíl od dat z Rumunska se zde jeví, že odstup signálu od šumu lze spolehlivě určit už při diferenci s 10 vzorky, ale s rostoucím počtem vzorků pro diferenci se odstup dále zlepšuje.



Obr. 2.4: Původní signál



(a) Detail - Diference o 10 vzorcích



(b) Detail - Diference o 100 vzorcích

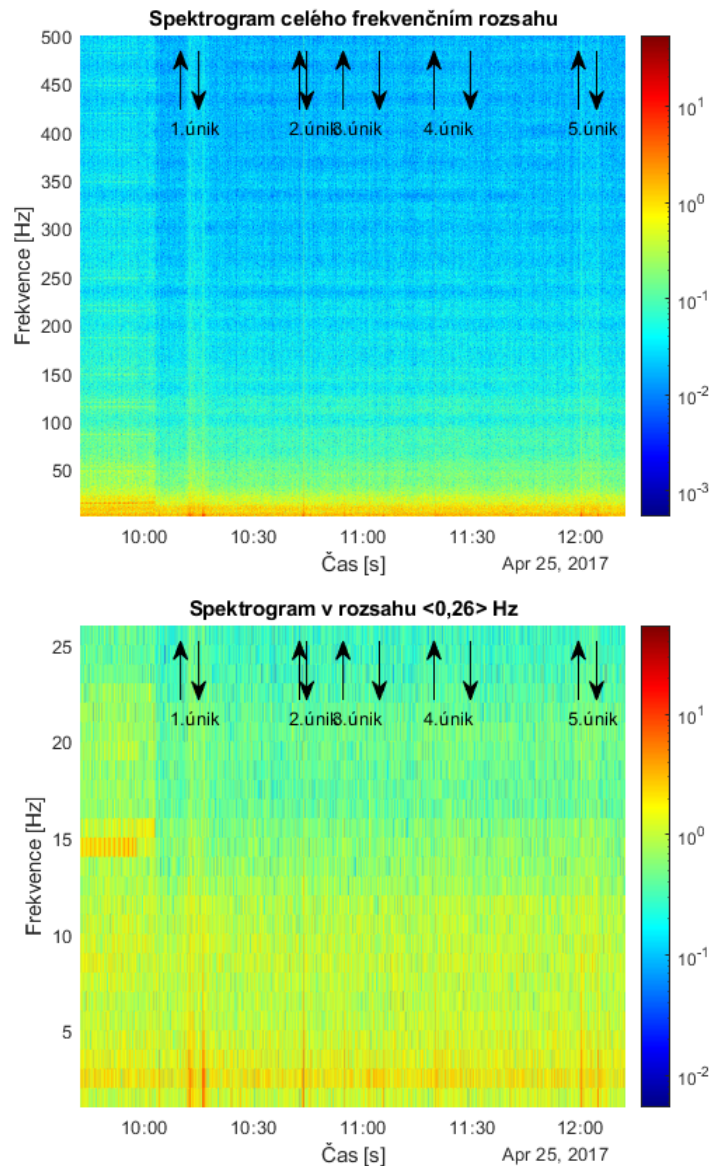
Obr. 2.4: Indie - Originální signál, filtrovaný signál a diference

## 2.4.2 Analýza ve frekvenční oblasti

Pro převedení dat do frekvenční oblasti můžeme použít diskretní krátkodobou Fourierovu transformaci (STFT) založenou na FFT, která pro výpočet používá jen konečné množství vzorků. U použitých vzorků navíc můžeme využít přesah určitého množství vzorků do několika po sobě jdoucích výpočtů. Díky tomu se budou případné projevy tlakové abnormality objevovat v posloupnosti několika frekvenčních charakteristik za předpokladu, že data s přesahem obsahují projev úniku.

Takto získané signály byly pro přehlednost zobrazeny v podobě spektrogramu. Díky tomu bylo možné porovnávat projevy dynamických dějů z frekvenční oblasti v čase a i případné další zpracování odpovídá tomu v časové oblasti. Tím bylo možné vytvořit pro referenční data z ropovodu v Rumunsku obr.2.5, konkrétně se jedná o spektrogram, kde každá STFT je počítána z 5000 vzorků a není použit přesah vzorků z důvodu přehlednosti spektrogramu, který byl jinak ve zvolené barevné škále grafu nečitelný z důvodu vzniklého šumu. Na první pohled je patrné, že při zobrazení celého frekvenčního rozsahu jsou veškeré děje uvnitř potrubí jen obtížně rozpoznatelné, protože se projevují jen v malých frekvencích. Z tohoto důvodu je zobrazen ještě druhý spektrogram, zobrazující frekvence jen do  $25\text{ Hz}$ . Zde už je možné rozpoznat jednotlivé změny tlaku v důsledku začátku úniku, ale také okamžiky kdy došlo k ukončení daného testovacího úniku. Na rozdíl od vyhodnocování signálu v časové oblasti, kdy bylo možné okamžitě rozpoznat nárůst nebo pokles tlaku podle toho, zdali se jednalo o lokální maximum nebo minimum, to ve frekvenční oblasti nebude možné. Z grafu je patrné, že jak při začátku tak i na konci dynamického děje dochází k nárůstu amplitudy, což nelze použít pro identifikaci, ale maximálně jen pro ověření předpokládaného úniku.

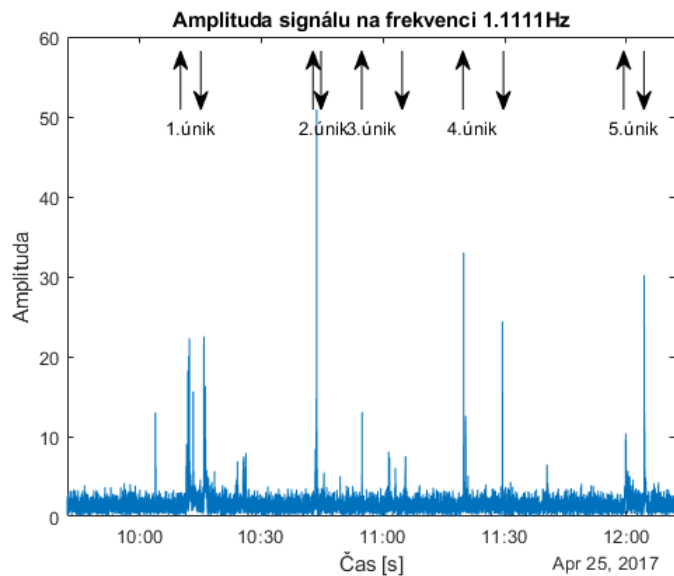
Naopak vzhledem k tomu, že se dynamické děje uvnitř potrubí projevují jen ve velmi



Obr. 2.5: Rumunsko - Spektrogram celého rozsahu a ořezaný na dynamickou část

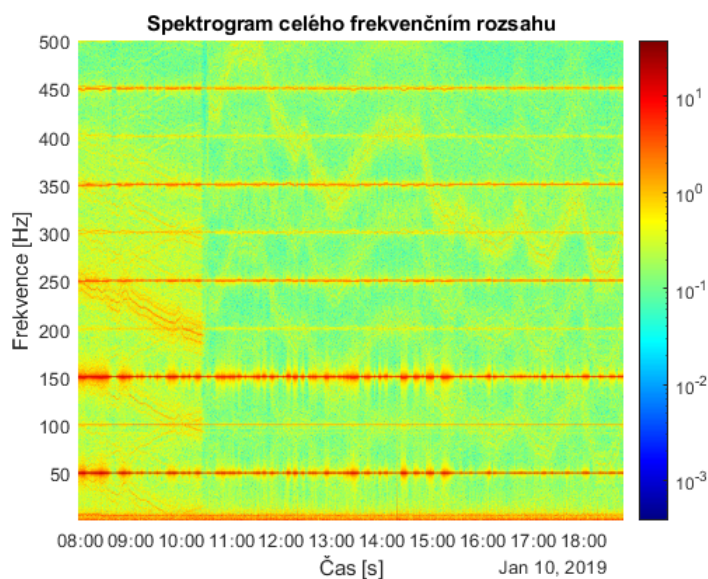
omezeném frekvenčním pásmu, je možné dále analyzovat jen amplitudu o konkrétní frekvenci v čase a tím se vyhnout analýze v trojrozměrném prostoru u spektrogramu. Největší zesílení amplitudy v čase úniku bylo dosaženo u nejnižších frekvencí viz. obr.2.6, kde lze rozpoznat všechny okamžiky, kdy došlo k jakékoliv výrazné změně tlaku.

V případě dat z ropovodu v Indii vidíme opětovně dynamické projevy dějů v potrubí jen při nízkých frekvencích. Současně je zde ale patrné rušení na násobcích síťové frekvence, konkrétně se jedná o frekvence 50, 150, 250, 350 a 450 Hz. Dále lze pozorovat dvě různé události přechodového charakteru, kdy první se vyskytuje na frek-

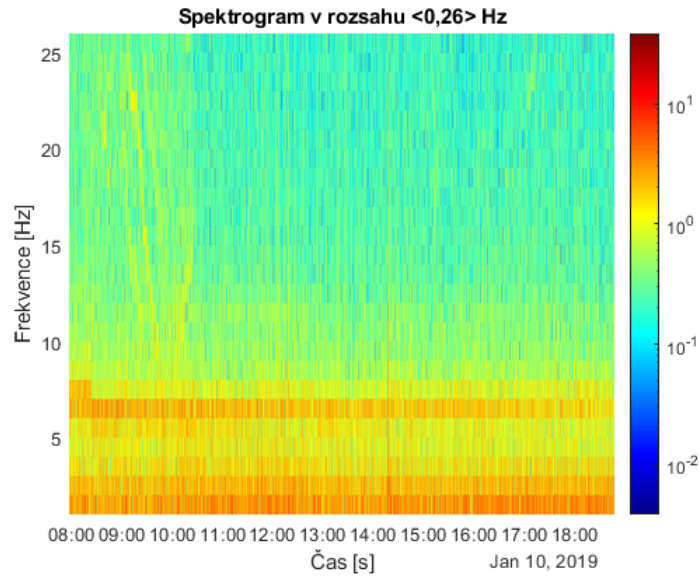


Obr. 2.6: Rumunsko - Amplitudová charakteristika v čase

venci  $100\text{ Hz}$  a druhá začíná na frekvenci  $230\text{ Hz}$  a s časem klesá. Bohužel u těchto přechodových událostí není možné zjistit, co je jejich zdrojem. Díky tomu vzniká potenciál na detekci dalších typů událostí, ale pouze v případě znalosti frekvenčního rozsahu, ve kterém se vyskytují. Poslední odlišnost oproti datům z Rumunska je signál v úrovni  $6\text{ Hz}$ , který bych, vzhledem k tomu že přesně kopíruje změny tlaku, označil za projev běžícího čerpadla, kdy viditelný propad tlaku i frekvence je způsoben snížením otáček čerpadla.







Obr. 2.6: Indie - Spektrogram celého rozsahu a ořezaný na dynamickou část

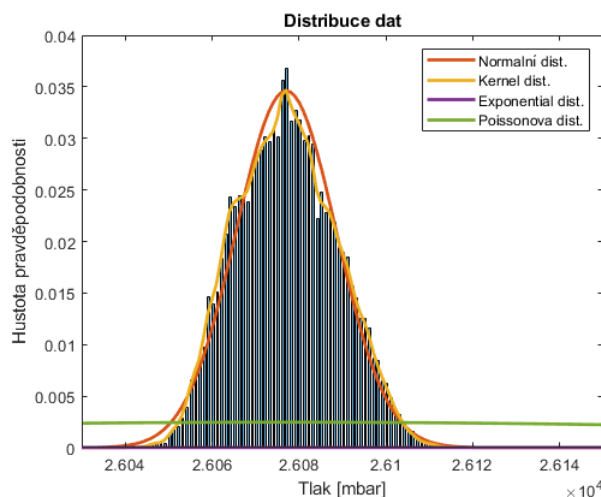
### 2.4.3 Analýza směru

Hlavním přínosem využití dvojice snímačů s vysokou vzorkovací frekvencí je možnost lokálně vyhodnotit směr, ve kterém došlo ke vzniku abnormality a tím dosáhnout vyšší spolehlivosti, protože bude možné snížit počet falešných detekovaných abnormalit. Pro tento účel je možné využít korelaci signálu z obou snímačů jako vhodný nástroj. Tím bude možné při nalezení abnormality v časové nebo frekvenční oblasti zvolit krátký časový úsek zachycující konkrétní únik a jeho hlavní rysy. Ten bude následně možné porovnat se signálem z druhého snímače zachycující delší časový úsek a nalézt zpoždění mezi oběma signály. Pro tento účel se používá křížová korelace, jejímž výsledkem je přímo počet vzorků, o kolik jsou signály posunuty. Pro potřeby detekce by ale bylo přínosnější vědět i míru závislosti, protože nemáme garantováno, že porovnávané vzorky skutečně budou zachycovat průběh úniku a nikoliv nějaký jiný děj.

Z tohoto důvodu namísto toho použijeme výpočet korelačního koeficientu, jehož výsledkem je závislost dvojice signálů o stejné délce. Kvůli tomu bude potřeba provést výpočet korelačního koeficientu v závislosti na velikosti časového posunu dvojice signálů. Z takto získaných hodnot závislostí můžeme určit okamžik, kdy je korelační koeficient maximální a tím stanovit jak míru závislosti, tak i najít posun mezi signály. Tento posun bude odpovídat času, který je nutný k přenesení abnormality přes vzdálenost mezi oběma snímači.

Nejčastěji používaný je Pearsonův korelační koeficient, který ale vyžaduje normální distribuci dat a lineární závislost mezi oběma veličinami. Pro ověření toho, jestli

měřená data mají normální rozdělení, byl zvolen úsek signálu bez výrazných dynamických dějů a na něj proveden histogram, který je porovnán s několika běžnými distribucemi pravděpodobnosti viz. 2.7. Na základě toho uděláme předpoklad, že data ze snímačů tlaku využívají normální rozdělení a tedy můžeme využít Pearsonův korelační koeficient. Samotný korelační koeficient se počítá z kovariance a směrodatné odchylky



Obr. 2.7: Určení distribuce dat

$$r_{xy} = \frac{cov(x, x)}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{n \sum_i x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (2.2)$$

kde

- $r_{xy}$ .....Pearsonův korelační koeficient
- $\sigma_x, \sigma_y$ .....směrodatná odchylka  $k$
- $x_i, y_i$ .....hodnota  $i$ -tého vzorku  $k$
- $n$ .....počet vzorků korelovaného signálu  $x$

Dále bude také nezbytné určit minimální vzdálenost mezi snímači se zohledněním šumu. Za tímto účelem by bylo ideálně potřeba znát přesně okamžiky, kdy došlo k úniku. Protokol o testovacích pokusech obsahuje tuto informaci jen s přesností na minuty, což pro tento účel není dostatečné. Z tohoto důvodu byl zvolen alternativní přístup. Ten spočívá ve výpočtu souboru korelačních koeficientů a z toho stanovených zpožděních na celém vzorku dat, který ale bude obsahovat značné množství dalších přechodových dějů, které se šíří potrubím. Ty je ale možné ze značné části omezit, pokud využijeme znalosti vzdálenosti mezi snímači tlaku na jedné stanici. Zohledníme-li rychlost šíření zvuku v ropě, tak v tomto konkrétním případě by vzdálenost 22,7 m mezi snímači tlaku u stanice č.2 byla uražena za 19 ms (při

předpokladu rychlosti zvuku v ropě  $1200 \text{ m/s}$ ). Na základě toho budeme jako akceptovatelné výsledky brát ty, kdy se detekované zpoždění nacházelo v dvojnásobném rozsahu  $\langle -40; 40 \rangle$ . Tím bychom měli zohlednit jen relevantní výsledky z obou směrů. Vzhledem k tomu, že nás v tento okamžik zajímá jen doba, za kterou urazí daná událost vzdálenost mezi snímači, vezmeme pak absolutní hodnotu detekovaného zpoždění z těchto výsledků. Tím jsme přišli o informaci o směru, ze kterého daná událost přišla, ale naopak můžeme získané výsledky vyhodnotit statisticky. Empiricky bylo vyzkoušeno, že je postačující už porovnávaný vzorek o délce  $100 \text{ ms}$  pro správné vyhodnocení korelačního koeficientu a časový posun druhého vzorku o stejné délce posunutý o  $-50$  až  $50 \text{ ms}$ . Aplikací na všechna dostupná data, kdy je použit pro vyhodnocení dat vzorek vytvořený každých  $100 \text{ ms}$ , získáme korelační koeficienty a k tomu příslušná zpoždění pro každý z těchto vzorků. Z nich byly vypočítány střední hodnoty a směrodatné odchylky, viz. 2.4.

Datum	25.04.	26.04.	27.04.
Střední hodnota [ms]	24,14	24,13	24,14
Směrodatná odchylka [ms]	13,83	13,74	13,92

Tab. 2.4: Rumunsko - Analýza směru stanice č.2

Jsou patrné určité rozdíly získané střední hodnotě vůči té, která byla určena ze vzdálenosti snímačů a rychlostí šíření vlny v médiu, které budou dané metodikou, kdy byli zahrnuti i další nežádoucí jevy, které se běžně vyskytují při provozu. Pro vyhodnocení minimální vzdálenosti bude ale významnější směrodatná odchylka, která nám říká o kolik se jednotlivá měření v průběhu dne lišila. Použitím pravidla tří sigma můžeme pro úspěšnou detekci směru s úspěšností 95 % využít dvojnásobek směrodatné odchylky ( $2\sigma$ ), jako vzdálenost kterou potřebnou pro vyhodnocení směru. Tím dostáváme zpoždění mezi snímači přibližně  $28 \text{ ms}$ , mohlo představovat minimální potřebnou vzdálenost  $33 - 41,5 \text{ m}$ . Reálně bude i výpočet směrodatné odchylky zatížen chybou a lze předpokládat, že tato hodnota bude menší.

## 2.5 Návrh detekce úniků tlaku

Pro návrh detekce byly použity stejné nástroje jako u analýzy. Vzhledem k poznatkům z analýzy můžeme i v případě detekce oddělit algoritmus v časové a frekvenční oblasti. Hlavní důraz bude kladen na detekci v časové oblasti, protože jen ta je schopná odhalit začátek úniku. Detekce ve frekvenční oblasti bude využita jen pro potvrzení úniků nalezených v časové oblasti.

### 2.5.1 Detekce v časové oblasti

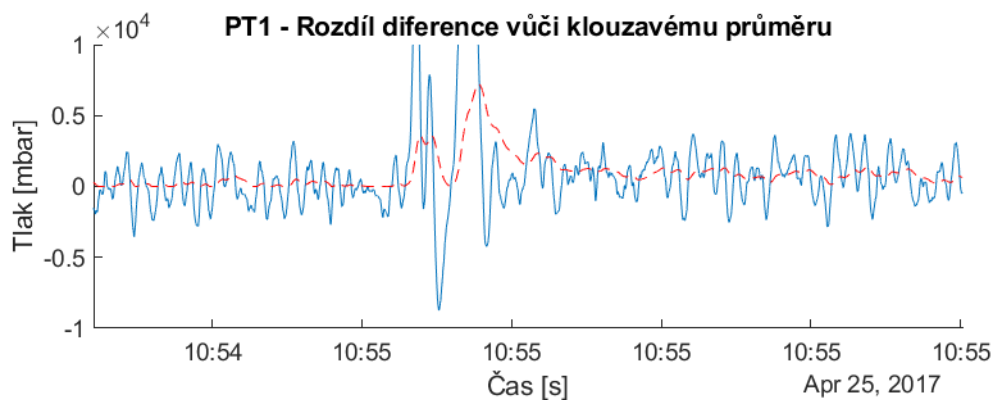
V prvním kroku byl volitelně odstraněn šum, který nevznikl provozem potrubí, pomocí IIR Butterworthova filtru 5.řádu typu spodní propust. V případě časové oblasti byla provedena diference několika po sobě jdoucích vzorků za účelem zvýraznění hran, které vznikly v signálu jako důsledek úniku. Při následném testování na signálu z obou stanic během různých dnů bylo zjištěno, že velikost amplitudy difference při úniku je závislá na vzdálenosti měřicího místa od úniku, a tedy takto získaný signál nelze vyhodnocovat jen na překročení předem definované statické prahové hodnoty. Stanovením statické úrovně došlo pouze k identifikaci úniků ve vzdálenosti, která byla použita jako referenční pro počáteční nastavení parametrů detekce. Navíc docházelo k falešné identifikaci dějů, které nastaly v okolí měřicí stanice, jako úniků. Jako jedno z možných řešení tohoto problému se nabízí porovnávat diference vůči plovoucímu průměru této difference z  $n$  vzorků vypočítané difference, popsány rovnicí 2.3.

$$x_{MA_{i+1}} = \frac{x_{i+1} + (n - 1) \cdot x_{MA_i}}{n} \quad (2.3)$$

Díky tomu dostaneme dvojici signálů, z nichž první se bude průběžně měnit v závislosti na tlaku a druhý bude představovat trend, kterým se diference ubírá. Druhý signál bude navíc oproti diferenci zpožděný o počet vzorků, ze kterých se počítá plovoucí průměr, jak je patrné na obr. 2.8.

Tím jsme získali dynamický práh, vůči kterému lze porovnávat diferenci a vzhledem k velké dynamice tlaku se problém detekce zjednoduší na stanovení délky úseku, po kterou musí být diference pod úrovní plovoucího průměru této difference.

Pro následné vyhodnocení byl použit tento algoritmus popsáný na obr. 2.9 Vzhledem k tomu, že je velice nepravděpodobné, aby došlo ke vzniku několika úniků ihned po sobě a je pravděpodobnější, že se jedná o projev prvního úniku, bylo doplněno omezení, že mezi dvěma úniky musí být určitý časový odstup. Tímto způsobem bylo možné získat dvě sady úniků, kde každá sada pochází z jednoho snímače tlaku v dané měřicí stanici. Pro zvýšení spolehlivosti byl vytvořen průnik obou množin a rozšířen i o úniky v blízkém okolí. Empiricky byly určeny následující parametry 2.5, které budou následně použity i při implementaci v programovatelném automatu.



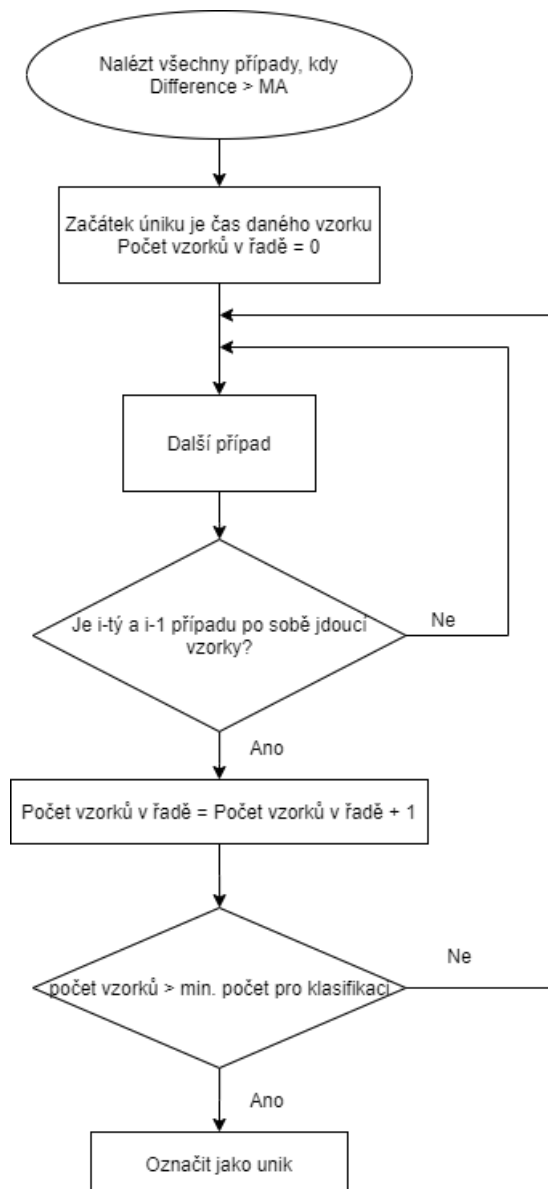
Obr. 2.8: Porovnání difference vůči plovoucímu průměru - detail

Tím jsme získali následující výsledky 2.10, na kterých je patrné, že metoda je velmi

Vzorky - pro diferenci	1000
Vzorky - klouzavý průměru	2000
Počet po sobě jdoucích vzorků pro vyhodnocení úniku	2000
Max. počet vzorků, nevykazující únik, při vyhodnocení úniku	3

Tab. 2.5: Parametry pro detekci dat v čase

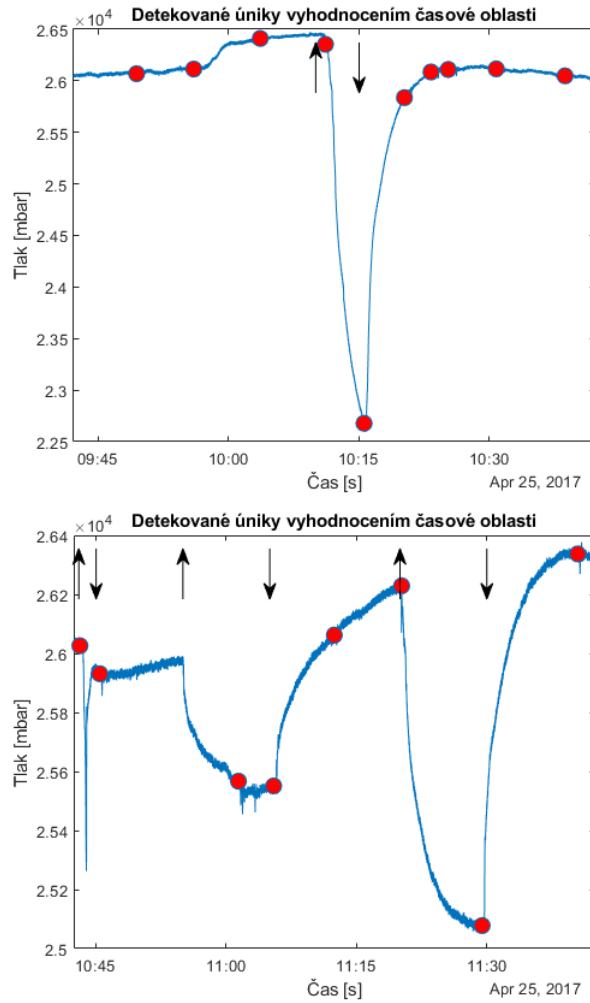
citlivá na jakoukoliv deviaci tlaku a vyhodnocuje větší množství úniků než ve skutečnosti je. To ale nemusí představovat problém, protože finální vyhodnocení úniku nemůže být nikdy jen na základě dat z jedné měřicí stanice, protože ta může být zatížena chybou v důsledku lokální abnormality, která ale neznamená vznik úniku. Naopak skutečný únik, který není danou stanicí detekován, může být detekován jinou měřicí stanicí nebo detekcí ve frekvenční oblasti.



Obr. 2.9: Vývojový diagram algoritmu pro vyhodnocení úniků v časové oblasti

## 2.5.2 Detekce ve frekvenční oblasti

Na základě analýzy ve frekvenční oblasti bylo patrné, že je možné provádět průběžně krátkodobou Fourierovu transformaci na podmnožině dat, u které byla následně vyhodnocována amplituda první harmonické frekvence v průběhu času. Vzhledem k tomu, že pro vyhodnocování úniku využíváme jen hodnotu první harmonické, můžeme výpočet Fourierovy transformace nahradit jen výpočtem první spektrální



Obr. 2.10: Rumunsko - Detekce úniku vyhodnocením časové oblasti

čáry pomocí rovnic 2.4, čímž významně snížíme nároky na výpočetní výkon.

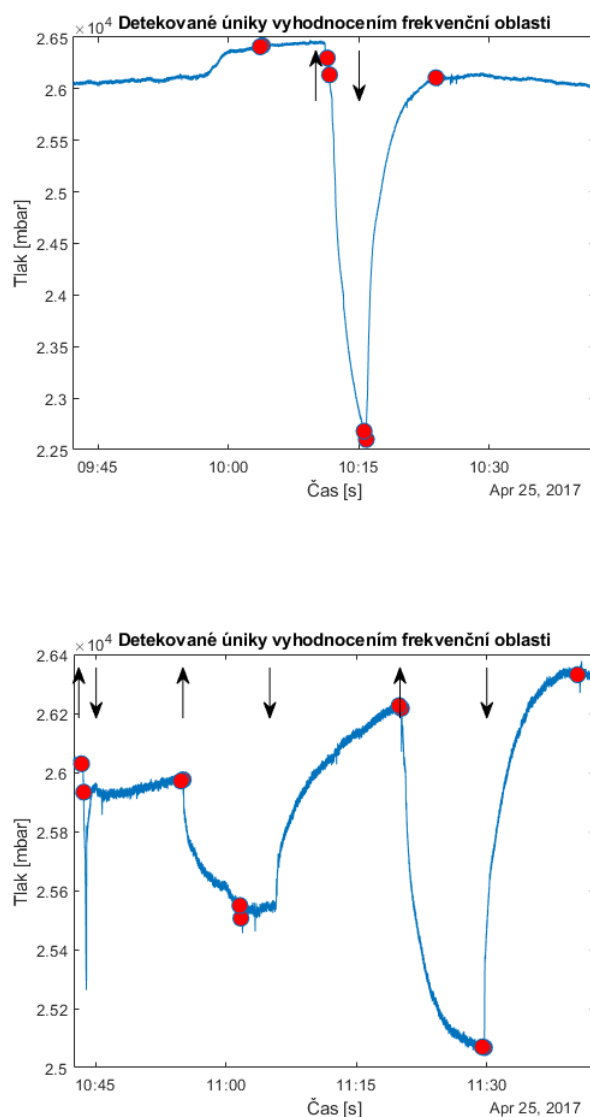
$$\begin{aligned}
 \Re_1 &= \sum_{i=1}^n x_i \cdot \cos\left(\frac{2\pi i}{n}\right) \\
 \Im_1 &= \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sin\left(\frac{2\pi i}{n}\right) \\
 S_1 &= \sqrt{\Re_1^2 + \Im_1^2}
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

Z ní už je možné vyhodnocovat amplitudu na překročení statické prahové hodnoty. Tato výsledná data už lze následně využít k vyhodnocení, protože by měla odpovídat přímo výskytu abnormalit uvnitř potrubí. Za účelem lepší přehlednosti došlo jen k potlačení vícenásobných úniků v těsné blízkosti za sebou. Pro účely dosažení maximální citlivosti byly zvoleny parametry v tab. 2.6, na základě kterých jsou abnormality jednoznačně rozlišitelné od zbylého běžného provozního stavu. Dosažené

výsledky jsou vidět na 2.11, kde je při porovnání s detekcí v čase patrné, že získané výsledky jsou podstatně střídmější. V důsledku toho bude možné využít tuto metodu jako jeden z mechanismů pro finální potvrzení úniku.

Počet vzorků pro výpočet Fourierovy transformace	1000
Přesah vzorků u výpočtu FT	500
Prahová hodnota amplitudy pro vyhodnocení úniku	7

Tab. 2.6: Parametry pro detekci dat ve frekvenční oblasti



Obr. 2.11: Rumunsko - Detekce úniku vyhodnocením frekvenční oblasti



### 2.5.3 Detekce směru

Posledním cílem této práce bylo určit, jestli je možné vyhodnotit směr, ze kterého měřící stanice detekovala únik. K tomu byla použit výpočet korelačních koeficientů signálů z obou snímačů tlaku, ale jen v okamžicích potenciálních úniků určených v časové oblasti. V důsledku toho získáme větší množství výsledků než je skutečně úniků. Na rozdíl od analýzy byla rozšířena délka okna zachycující únik na 1000 vzorků, abychom měli zaručeno, že korelovaná data obsahují jeho průběh a dvojnásobné okno, vůči kterému je signál porovnáván.

Tento algoritmus byl následně aplikován na výsledky získané při detekci úniku v časové oblasti, které budou primárně sloužit k identifikaci úniků. Pokud se navíc omezíme jen na okamžiky, které byly detekovány a navíc během nich došlo k některému z úniků, dostaneme poté následující výsledky tab.2.7.

Z nich je patrné, že možnost určit směr při běžném provozu se nepodařilo při třech

Č. úniku	Stanice č.2		Stanice č.3	
	Začátek	Konec	Začátek	Konec
1	→ / ←	→ / ←	→ / ←	→ / ←
1a	→ / →	→ / →	← / ←	← / ←
2	→ / →	→ / →	← / ←	← / ←
3	→ / →	→ / →	← / ←	← / ←
4	→ / →	→ / →	→ / ←	→ / ←
5	← / →	← / →	← / ←	← / ←
6	→ / →	-	← / ←	-
7	-	→ / →	-	← / ←
8	→ / →	-	← / ←	← / ←
9	-	-	→ / ←	→ / ←
10	→ / →	→ / →	← / ←	← / ←
11	-	→ / →	-	→ / ←
12	-	-	← / ←	← / ←
16	→ / →	← / →	← / ←	→ / ←

Tab. 2.7: Detekce směru u jednotlivých testovacích úniků (detekovaný směr/skutečných směr vzniku)

testovacích únicích. V případě statického provozu nebylo možné spolehlivě určit směr jen v jednom případě ze tří (únik č.16) a to jen při začátku úniku. Z toho můžeme vyhodnotit, že výsledky z určení směru bude možné využít jen k mírnější selekci dat z jednotlivých stanic.

Vzhledem k tomu, že kromě směru máme k dispozici maximální korelační koeficient  $\rho$ , byly tak porovnány úniky i vůči této hodnotě. Z nich bylo patrné, že by bylo možné stanovit práh, pro který bude platit, že pro vyhodnocení budou použity jen výsledky s  $\rho$  větším než je tento práh. Bylo by tím možné snížit počet falešně identifikovaných úniků. Bohužel při vyhodnocení těchto případů došlo i ke špatné identifikaci dvou úniků skutečných. Tyto výsledky jsou zobrazeny v tab.2.8,2.9,2.10.

## 2.5.4 Vyhodnocení detekce

Pro vyhodnocení faktu, že došlo k úniku, budeme předpokládat, že daný únik byl detekován alespoň dvěma různými měřícími stanicemi. Tím by mělo být zamezeno tomu, aby byly vyhodnocovány falešné úniky vzniklé v důsledku lokální deviace tlaku v blízkém okolí některé z měřících stanic, které nemají se skutečným únikem nic společného. Ručním vyhodnocením detekovaných časů úniku ve frekvenční i časové oblasti bylo možné dosáhnout pro data ze dne 25.4.2017 těchto výsledků v tab. 2.8,2.9 a 2.10. Pro odstranění dodatečných falešných úniků byla do výsledků zařazena jen ta data, která jsou celkově potvrzena alespoň třemi různými zdroji z obou stanic. Tím je zaručeno, že bude k vyhodnocení použita vždy detekce v čase u alespoň jedné stanice, tím pádem bude k dispozici i výsledek určení směru. Důsledkem toho bude možné významně omezit časový interval, ve kterém budeme očekávat výsledky. V našem případě, kdy jsou jen dvě měřící stanice, tento přínos nebude tolik významný, ale v případě delšího potrubí, kde by jich bylo využito větší množství, by to vedlo k podstatně výraznějšímu vlivu.

V tomto případě byly mezi vyhodnocené úniky zvoleny ty, u nichž došlo k průniku v čase v intervalu  $\lesssim 55$  s, který byl daný vzdáleností mezi stanicemi a spodní hranicí rychlosti šíření zvuku v ropě tj.  $1200$  m/s, která byla zvolena vzhledem k neznalosti přesné rychlosti šíření zvuku v tomto médiu.

Z tab. 2.8 je patrné, že během prvního dne nebyl z provedených úniků detekován pouze jeden pokusný únik, který byl ale proveden ve statickém režimu za sníženého tlaku. V tom případě klesá energie zvukové vlny a tím i šance na detekci více stanicemi. Pokud pomíneme detekované konce testovacích úniků, které bude nutné řešit na uživatelské úrovni (například pomocí potvrzení operátorem provozu) a změny tlaku v důsledku změny stavu čerpadel, které lze maskovat pomocí signálu o jejich stavu, došlo poté ke třem falešným únikům. Porovnáním se signály tlaku bylo zjištěno, že ve všech třech případech se jednalo o anomálii tlaku, při které došlo k jeho prudkému poklesu, což je i charakteristika úniku.

Během druhého dne tab. 2.9 nebyl detekován únik (č. 11) během statického režimu provozu a navíc v případě úniku č.9 byl detekován jen jeho konec. Ve zbylých výsledcích byl první falešný únik vyvolán krátce po startu detekce, kdy výpočty

klouzavého průměru a diference ještě nebyly plně ustáleny. Takže zbývá jediný falešný únik, který nastal při prudkém nárůstu a následném poklesu tlaku.

Třetí den došlo v celém rozsahu potrubí ke vzniku rušení, které významně snížilo schopnost detekce. Ze všech úniků provedených ten den se podařilo určit jen jediný únik a to během statického režimu, kdy došlo k poklesu rušení. Z tohoto důvodu lze předpokládat, že během testů došlo k modifikaci čerpadel za účelem prověření funkčnosti detekce během jejich nestandardního stavu. Ze špatně identifikovaných výsledků se v prvním případě jedná o abnormalitu doprovázenou prudkým poklesem tlaku, která má všechny rysy úniku a v druhém případě došlo k chybnému vyhodnocení během inicializace metody.

Dosažené výsledky nedosahují moc výrazné přesnosti detekce, ale dávají prostor ke zlepšení výsledků při následné implementaci do programovatelného automatu a dalším ladění.

Čas úniku	Stanice č.2	Stanice č.3	Pozn.
10:03	t f	t	
10:11	t* f	t*	únik č.1
10:43	t* f	t*	únik č.1a
11:01	t* f	t	únik č.2
11:20	t* f	t*	únik č.3
11:29	t* f	t	konec č.3
11:40	t* f	t	
12:00	t* f	t	únik č.4
12:04	t* f	t*	konec č.4
12:27	t* f	t	vypnutí čerpadel
12:48	t*	t* f	
13:28	f	t* f	pokles tlaku na 0 bar
13:42	t*	t* f	natlakování potrubí

Tab. 2.8: Vyhodnocení detekce ze dne 25.4.2017 (t - detekováno v čas. oblasti, f - detekováno ve frek. oblasti, \* - označeny úniky s mírou závislosti  $\rho_{max} \geq 0.65$ )

To, která stanice byla schopna daný testovací únik detekovat, bylo dáno především vzdáleností dané stanice od místa úniku. Tomu odpovídají i výsledky, protože úniky 1-7 byly provedeny v blízkosti měřící stanice č.2 a úniky 8-16 byly blíže stanici č.3. Oproti předpokladu byl algoritmus schopný detekovat i 2 ze 3 úniků provedených během statického stavu potrubí. Potenciálem navržené metody je možnost jejího použití i pro detekci na skutečném potrubí a to v případě úspěšného snížení množství vyhlášených falešných úniků. To by vyžadovalo doplnění vyhodnocení místa vzniku,

Čas úniku	Stanice č.2	Stanice č.3	Pozn.
10:16	t* f	t	ihned po startu
10:30	t f	t* f	únik č.6
10:41	t* f	t* f	únik č.7
11:40	t* f	f	vypnutí čerpadel
12:26	t* f	f	
12:49	t* f	t*	únik č.8
13:54	f	t f	konec č.9
14:10	t* f	t*	únik č.10
14:14	t f	t* f	konec č.10
14:27	t* f	t* f	vypnutí čerpadel

Tab. 2.9: Vyhodnocení detekce ze dne 26.4.2017 (t - detekováno v čas. oblasti, f - detekováno ve frek. oblasti, \* - označeny úniky s mírou závislosti  $\rho_{max} \geq 0.65$ )

Čas úniku	Stanice č.2	Stanice č.3	Pozn.
11:16	t f	f	
11:30	t* f	f	únik č.16
11:35	t f	t* f	konec č.16
12:48	t f	t	

Tab. 2.10: Vyhodnocení detekce ze dne 27.4.2017 (t - detekováno v čas. oblasti, f - detekováno ve frek. oblasti, \* - označeny úniky s mírou závislosti  $\rho_{max} \geq 0.65$ )

což by mohlo dodatečně množství falešných úniků snížit, protože by se vyhodnocovaly jen úniky uvnitř měřeného úseku.

V souvislosti s detekcí směru, ze kterého přišel únik, dosahujeme v případě dat ze stanice č.2 dostatečné úspěšnosti na snížení počtu falešných úniků. To je možné z toho důvodu, že lze vynechat úniky pocházející mimo monitorovaný úsek. Bohužel by tak došlo i k odstranění jednoho skutečného, což je nepřijatelné.

V případě stanice č.3 je úspěšnost určení směru podstatně horší, je to však jen důsledkem toho, že je vzdálenost mezi snímači o 7 metrů kratší. Pokud by došlo k prodloužení vzdálenosti, ve které se vzájemně nacházejí snímače, detekce by se mohla zvýšit na takovou úroveň, při které by se dalo využít i směru vlny pro zlepšení detekce úniků.

## 3 Realizace řešení

Pro účely implementace algoritmu bude potřeba zvolit vhodný hardware, který by splňoval všechny požadavky, které lze od takového systému očekávat. Hlavním požadavkem je to, že implementovaný algoritmus musí být vykonáván v reálném čase. Za tímto účelem bude použit průmyslový automat, který je pro tyto účely vhodný. V tomto případě bude použit PLC X20CP3585 od společnosti BR Automation, který byl použit i pro záznam testovaných dat. Jedná se o automat střední třídy, který vzhledem k použitému procesoru je vhodný i pro výpočetně náročnější úlohy a který lze doplnit o tři modulární rozšíření komunikačních rozhraní. Vývojové prostředí pro něj umožňuje vytvářet programy pomocí programovacích jazyků z normy IEC 61131-3 a navíc i ANSI-C a C++. Implementace algoritmu bude probíhat pomocí programovacího jazyka ANSI-C, díky kterému bude možné přenést výsledný algoritmus i na jiná zařízení nebo platformy a bude možné použít již hotové knihovny jazyka C.

### 3.1 Připojení snímačů tlaku

Do těchto rozšíření lze použít modul X20IF1041-1[11], který umožňuje komunikaci pomocí protokolu CANopen s využitými snímači tlaku od společnosti Keller. Tento komunikační protokol umožňuje i zapojení více snímačů využívajících tento protokol do série pomocí tzv. daisy-chain. Modul komunikačního rozhraní dovoluje využití maximální přenosové rychlosti až  $1 \text{ Mbit/s}$ , což je dostatečné pro vyčítání hodnot tlaku z jednoho snímače frekvencí  $1000 \text{ Hz}$ . Pokud bychom využili zapojení do série, tak v případě dvojice snímače dojde k snížení přenosové rychlosti pro komunikaci s konkrétním snímačem na polovinu, tj.  $500 \text{ kbit/s}$  [12]. Tím riskujeme, že objem přenesených dat za sekundu by mohl být větší než je přenosová rychlost a mohlo by dojít k narušení cyklické komunikace. Z tohoto důvodu byl zvoleno PLC s trojicí rozšíření, která umožní využití stejného množství snímačů tlaku.

V případě potřeby využití snímačů tlaku připojených pomocí proudové smyčky namísto komunikačního protokolu CANopen je možné volit z mnoha tomu odpovídajících modulů analogových vstupů z portfolia výrobce. Jako vhodná volba se jeví například modul X20AI2437, který využívá 15-bitový sigma-delta digitální převodník a navíc obsahuje programovatelný filtr typu Sinc, který ve výchozím stavu odfiltrovává rušení na síťové frekvenci.

## 3.2 Zdroj času

Kromě samotného měření je další nedílnou součástí měřicí stanice potřeba zdroje přesného času. Ten je možné využít při následné práci na centrální úrovni, kde je vyhodnocování dat z více stanic. Potřeba velmi přesného času je nutná především při určování přesného místa vzniku úniku, kdy sebemenší nepřesnost způsobuje velké chyby při určení místa. Například pro rychlost šíření negativní vlny u ropy  $1200\text{ m/s}$ , způsobuje každá chyba času o  $1\text{ ms}$  chybu o  $1,2\text{ m}$ .

Z tohoto důvodu se využívá synchronizace času pomocí GPS nebo lokálního NTP<sup>1</sup> serveru. Konkrétní volba je závislá na použité komunikaci mezi jednotlivými stanicemi. GPS je v praxi obecně nejpoužívanější, protože kromě toho, že každá stanice musí být vybavena svým vlastním GPS přijímačem, nemá žádné další požadavky. Pro získání synchronizace satelitního času je potřeba spojení s alespoň čtyřmi satelity, avšak pokrytí by mělo být dostatečné pro většinu míst. Pro samotnou synchronizaci je následně možné využít komunikaci pomocí sériové linky RS232, kdy jsou vyčítány NMEA data. Jedná se o standart, který je připravený pro široké spektrum různých aplikací v podobě různých zpráv. Z nich je možné zvolit jen ty potřebné pro danou činnost nebo pro diagnostiku. Pro dosažení průběžné kontroly synchronizace času se dále využívá signál PPS (pulse per second), což je krátký periodický puls, který GPS posílá.

V případě NTP serverů se některá stanice (většinou ta centrální) chová jako zdroj času pro všechny ostatní. Ta také může získat přesný čas ze satelitů nebo z jiného NTP serveru vyššího řádu, který dosahuje menší chyby času. Zbylé stanice následně synchronizují svůj čas s touto stanicí, k čemuž je potřeba mít zajištěnou stabilní komunikaci (typicky pomocí optických vláken), která ale především u existujících potrubí nemusí být použita a jiné typy komunikací, například pomocí mobilní sítě, nemusí být dostatečně spolehlivé pro udržení přesného času. Použití NTP serveru je ale zpravidla výrazně jednodušší oproti GPS, protože tato funkcionality je zpravidla běžně implementována do programovatelných automatů, takže se jedná jen o nastavení parametrů.

## 3.3 Implementace algoritmu

K tomu, aby bylo možné použít algoritmus vytvořený v Matlabu, je ho nejprve potřeba upravit pro použití v programovatelných automatech a to především k tomu, aby ho bylo možné použít pro zpracování dat v reálném čase. Tento algoritmus musí být navíc probíhat tolikrát, kolik je ke stanici připojeno snímačů tlaku.

Použité PLC je založené na procesorové architektuře x86 Intel Atom o taktu  $1\text{ GHz}$

---

<sup>1</sup>Network Time Protocol - protokol pro synchronizaci času po síti

[13]. Ta je doplněná paměť L1 cache pro data o velikosti 24 *kB* a pro program o velikosti 32 *kB*. Na něm běží RTOS<sup>2</sup> Automation Runtime. Ten obsahuje plánovač procesů, který řídí jednotlivé úlohy a je i zodpovědný za jejich synchronizované provádění v definovaném čase. Konkrétně je možné stanovit v jaké periodě jsou prováděny jednotlivé úlohy a tolerance, jaké se může u prováděných úloh dopustit. Vzhledem k tomu, že vzorkovací frekvence snímačů tlaku je 1000 *Hz*, by bylo ideální provádět všechny úlohy při periodě 1 *ms*, čímž bychom měli teoreticky dosahovat identických výsledků, jako tomu bylo v Matlabu. Bohužel použitý procesor nemá potřebný výkon a tak bude nutné provést ústupky.

Hlavní změna se bude týkat detekce v časové oblasti, kdy nebude možné při každém novém vzorku počítat diferenci a klouzavý průměr, ale namísto toho při dodržení vzorkovací frekvence snímačů tlaku ukládat tato data do kruhové fronty. Ta bude následně použita jako zdroj dat pro veškeré další operace. Pokud budeme předpokládat použití parametrů zvolených při návrhu algoritmu v Matlabu, pak byla zvolena velikost této kruhové fronty zachycující vždy posledních 10 *s* pro každý snímač tlaku. Tato délka záznamu se ukázala jako dostatečná pro vyhodnocení úniků a současně nedochází k významnému zaplnění paměti, která je potřeba především při výpočtu první harmonické a korelačních koeficientů.

Využití kruhové fronty by nemělo mít žádný vliv na vyhodnocení úniků ve frekvenční oblasti, protože je počítána ze zvoleného počtu vzorků (ten byl při analýze zvolen 1000), který je snížený přesahem vzorků (500 vzorků). Díky tomu bude stačit provedení výpočtu každých 500 vzorků, jehož ekvivalent bude využití úlohy s periodou provedení 500 *ms*. Tím by nemělo dojít k významně jiným dosaženým výsledkům v porovnání s výpočtem v Matlabu a navíc to nepředstavuje velké požadavky při výpočtu.

Poslední položkou, která by mohla být tímto ovlivněna, je určení směru. Pokud budeme předpokládat, že směr bude určován jen při nalezení úniku tj. nepravidelně, nemělo by poté ani zde dojít k žádnému ovlivnění.

Mimo zaplněnost paměti bude také rozhodující, aby programovatelný automat zvládl všechny úlohy cyklicky vykonávat ve stanoveném intervalu. Pro tyto účely bohužel neexistuje vhodný nástroj, kterým by se dalo jednoznačně určit optimální délku intervalů. Z tohoto důvodu je jejich volbu nutné provést empiricky na dostupných testovacích datech.

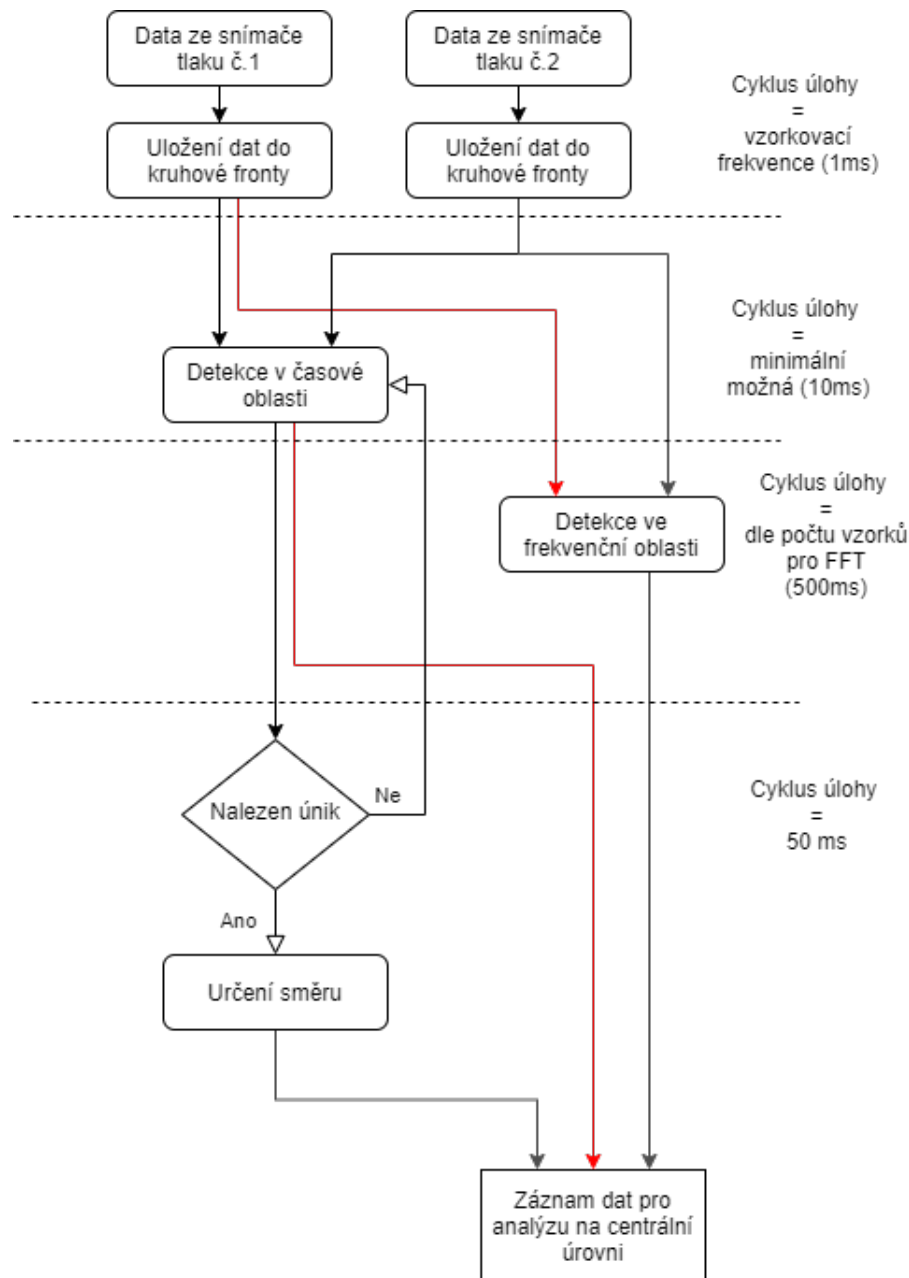
### 3.3.1 Detekce úniků

Samotná detekce se bude skládat z několika částí na základě poznatků získaných při analýze a návrhu detekce v Matlabu. V první řadě se bude jednat o nalezení úniku na

---

<sup>2</sup>Real-time operating system - operační systém reálného času

základě detekce v časové oblasti. Ta bude tvořit nejdůležitější část, protože pokud výsledky ze zbylých metod nebudou podpořeny odpovídajícím výsledkem v čase, nebude poté nikdy možné pozitivně vyhodnotit únik. Pokud dojde k nalezení potenciálního uniku v časové oblasti, bude tento záznam poté dále zpracováván za účelem určení směru vzniku. Nezávisle na tom se bude provádět nalezení možných úniků ve frekvenční oblasti. To ale nebude sloužit jako nástroj, pomocí kterého je možné potvrdit možný únik, a tedy z těchto výsledků nebude docházet k určení směru. Zjednodušené schéma algoritmu pro jednu měřící stanici je na obr.3.1. Získané vý-



Obr. 3.1: Detekce v měřící stanici



sledky budou přeneseny do centrální stanice pro zpracování výsledků ze všech stanic. Vzhledem k tomu, že data, která jsou k dispozici, jsou jen z krátkého úseku potrubí, který disponoval jen dvěma stanicemi, budou vyhodnocována data pouze z nich. Celý algoritmus je ovšem koncipován i pro nasazení v konfiguraci skládající se z libovolného množství měřících stanic.

## **Nalezení úniku**

Pro nalezení úniku v čase je využit algoritmus popsáný v kapitole 2.4.1. V důsledku jiného zpracování dat, kdy jsou zpracovávána data uložena v kruhové frontě, která je neustále doplňována, je potřeba následujícího. Zpracovávat pouze data, která jsou aktuální, ale u kterých budeme mít jistotu, že se nebudou měnit. Z tohoto důvodu je před každým provedením algoritmu zkopírovány hodnoty z kruhové fronty do pole o počtu vzorků potřebných pro výpočet diference. Z něj už bude vypočítána diference podle vzorce 2.1.

Z diference je následně počítán klouzavý průměr, k čemuž je použit výrobcem předpřipravený filtr stejného jména. Ten je preferován oproti jiným řešením, protože lze předpokládat, že je maximálně optimalizován pro použitý programovatelný automat, ale jeho výpočet vychází ze vzorce 2.3.

Diference je následně porovnávána vůči klouzavému průměru, kdy pokles diference signalizuje pokles tlaku oproti současnému trendu. Pokud je počet po sobě jdoucích vzorků, které vykazují tento jev, stejný jako stanovená hranice, dojde k vyhodnocení úniku a je zaznamenán datum a čas tohoto úniku. Čas úniku odpovídá prvnímu vzorku z dané série, kde byla diference pod úroveň klouzavého průměru. Protože každá měřící stanice má dva snímače tlaku, dochází tak k vyhodnocení signálu z obou snímačů současně a detekovaný únik je poté získán průnikem obou výsledků. Kromě času je pro následné využití při určení směru zaznamenán, i který ze snímačů jako první tento únik zachytil.

## **Určení směru**

Podobně jako v případě hledání úniku i zde je potřeba jako první krok algoritmu zkopírovat hodnoty z kruhové fronty do pole, kde nebude docházet ke změnám hodnot. Při určení směru je tento krok více důležitý, poněvadž kdyby byla v důsledku chyby při zpracování data v poli z obou snímačů posunuta, vznikla by tak chyba při následném vyhodnocení směru, která by mohla vést k nesprávným závěrům. Při zaznamenání konkrétního vzorku úniku je potřeba zohlednit fakt, že i provedení algoritmu pro nalezení úniku v čase trvá nějakou dobu, stejně tak i samotné spuštění úlohy pro detekci směru. Algoritmus je navíc možné provést teprve poté, co máme data k analýze. Zde nastává možná komplikace, kdy je možné zpracovat jen data o

určitém zpoždění v důsledku omezené velikosti kruhové fronty a potřeba minimalizovat provedení celého algoritmu.

Protože určení směru je prováděno přímo na měřící stanici a vzhledem ke způsobu vyhodnocení detekce úniku v časové oblasti, musí být mezi dvěma po sobě jdoucími detekovanými úniky nějaké minimální zpoždění, což by toto riziko mělo snížit. Přesto bude potřeba ale zohlednit i to, že detekce směru pomocí Pearsonova korelačního koeficientu je výpočetně náročnější a nebude jí proto možné provést jen v průběhu jednoho cyklu úlohy. Po dobu vykonávání navíc musí být hodnoty uložené v poli, které jsou provedeny jako první krok, zachovány, jinak bychom dostali nesmyslný výsledek. Tím může dojít k dodatečnému zpoždění při vyhodnocování a také k tomu, že kruhová fronta s novým detekovaným únikem bude přepsána novějšími daty.

Se znalostí snímače, který jako první detekoval únik v časové oblasti, jsme schopni použít z jeho dat záznam úniku jako vzorový signál, který budeme porovnávat s odpovídajícím signálem z druhého snímače. Druhý signál bude mít v poli dvojnásobnou délku, kdy bude zachycen signál o vzorcích posunutých vůči vzorovému signálu o  $-1/4$  až  $1/4$  délky tohoto pole. Pokud tedy využijeme pro vzorový signál záznam o 1000 vzorcích, pak bude druhý signál obsahovat vzorky starší o 500 vzorků (ms) až po vzorky o 500 vzorků (ms) novější než ty obsažené ve vzorovém signálu. Při samotném vyhodnocení pak tedy bude nutné provést výpočet Pearsonovy korelačního koeficientu tolikrát, kolik činí rozdíl mezi porovnávaným a vzorovým signálem. Vzhledem k tomu, že cílem není určit přesný okamžik, kdy byl maximální korelační koeficient  $\rho$ , ale jen stanovit směr tj. určit do kterého ze dvou intervalů daný výsledek spadá, není proto potřeba počítat každý posun o 1 vzorek. Místo toho můžeme počítat každý  $n$ -tý vzorek, čímž bude algoritmus výpočtu korelačního koeficientu  $n$ -krát méně náročný.

Následně potřebujeme už jen najít okamžik, kdy  $\rho$  nabývá maximální hodnoty a jeho index, který odpovídá zpoždění při detekci. Vzhledem ke zjištěním při návrhu algoritmu v Matlabu budou do centrální stanice poslány kromě zjištěného zpoždění i maximální korelační koeficient. Z důvodu optimalizace algoritmu je výpočet korelačního koeficientu založený na [14], který ale využívá výpočet pomocí 2.2.

## Potvrzení úniku

Obdobně jako v obou předešlých případech bude i zde jako první krok uložení dat do pole, které je jednodušší na procházení a práci s ním. Jeho velikost je dána počtem prvků, ze kterých budeme počítat první spektrální čáru tj. 1000 vzorků. Z něj už můžeme vypočítat reálnou a imaginární část první spektrální čáry pomocí sinovy resp. cosinovy transformace uvedené v rovnici 2.4 a z nich i výslednou amplitudu.

Jak už bylo zmíněno, ta je porovnána s definovanou pevnou mezí a jako možný únik je následně vyhodnoceno překročení této meze, které nastalo u obou snímačů tlaku současně. Vzhledem k tomu, že v okamžiku, kdy by došlo k úniku, by došlo také k vytvoření velkého množství záznamů o detekovaných únicích, byl algoritmus ještě doplněn o minimální čas, který musí být mezi dvěma detekovanými úniky po sobě. Výsledkem detekce je opět jen údaj o času, kdy k detekovanému úniku došlo.

### 3.4 Komunikace

Pro přenos dat mezi jednotlivými měřicími stanicemi a centrální stanicí bude potřeba zvolit takový způsob komunikace, který bude co nejuniverzálnější a tedy bude splňovat největší množství požadavků, které by při následném nasazení systému detekce mohly vzniknout. Při návrhu budeme vycházet z toho, že by mělo být možné komunikovat na libovolnou vzdálenost (může jít až o stovky kilometrů). Pokud chceme použít univerzální řešení, poté se jeví jako nejvhodnější komunikace pomocí ethernetové sítě. To nám dovolí použít různé běžně používané konfigurace. V praxi je nejčastější využití uzavřené sítě založené na optických kabelech, které využívají všechny podpůrné systémy pro správu a řízení potrubní přepravy nebo tam kde toto není možné, tak komunikace založená na mobilních sítích.

Kromě komunikačního rozhraní je potřeba zvolit i konkrétní protokol, který by zajišťoval spolehlivý přenos dat. Bylo by žádoucí, aby použitý komunikační protokol umožňoval diagnostiku a případně i čtení dat dalším uživatelům. Z tohoto důvodu nebudeme brát v potaz ty protokoly, které slouží jen pro interní komunikaci programovatelných automatů jednoho konkrétního výrobce.

Poté se pro průmyslové nasazení nabízí:

- Modbus TCP
- OPC - OLE(Object Linking and Embedding) for process control

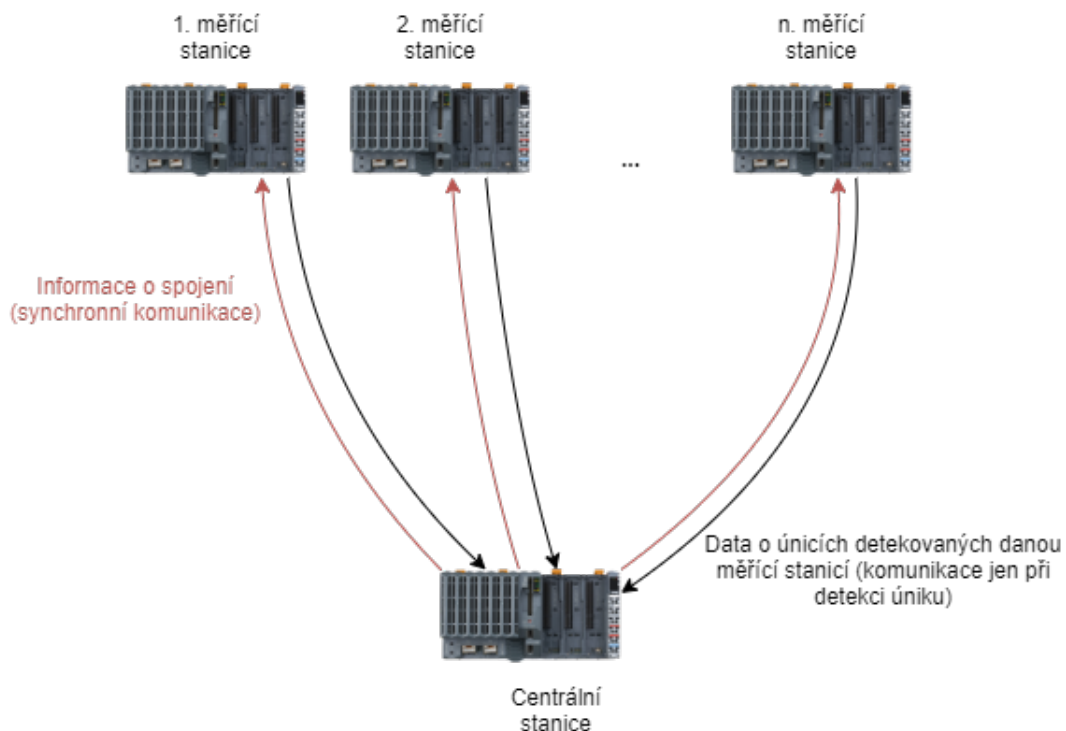
Protokol Modbus TCP vychází z protokolu Modbus RTU, který byl vytvořen společností Modicon v roce 1979 a slouží pro komunikaci pomocí sériové linky [15]. Původní verze je doplněna jen o transportní obálku, která je následně přenášena pomocí protokolu TCP/IP. Samotný přenos dat je asynchronní a umožňuje přenášet jen data o velikosti bit nebo word (16 bitů). Z tohoto účelu by v případě použití datových typů o jiné délce, bylo potřeba se postarat ještě o dělení do těchto velikostí.

Protokol OPC byl původně vyvinut společností Microsoft v roce 1996 pro komunikaci průmyslových zařízení s počítači založenými na operačním systému Windows [16]. Od té doby došlo k vytvoření nové platformy OPC UA (Unified Architecture) v roce 2008, která vychází z původního návrhu protokolu, ale je už vyvinuta konsorciem OPC Foundation sdružující výrobce různých zařízení pro průmysl a i pro

další odvětví. Tato komunikační platforma byla vytvořena s cílem, aby splňovala požadavky pro moderní komunikaci z průmyslu a současně i z IT a byla připravena pro tzv. Průmysl 4.0. Mezi tyto požadavky patří možnost komunikace mezi libovolnými zařízeními (je to nezávislá platforma a tedy už není omezená na operační systém od Microsoftu), možnost zabezpečit spojení pomocí šifrování přenášených dat a přístup k datům po autentizaci uživatelských práv a možnost přenášet data o libovolné komplexnosti a téměř libovolném počtu dimenzí. Přenos dat může být jak asynchronní, tak i synchronní a součástí OPC UA jsou i nástroje pro detekci spojení a obnovení dat při její případné ztrátě.

Ačkoliv by bylo možné použít obě popsaná řešení, tak především z důvodu přímé implementace OPC UA do programovatelných automatů výrobcem, dále možnosti zabezpečení přenášených dat a pokročilého řízení samotného přenosu, bylo zvoleno toto řešení.

Samotná komunikace by měla mít co nejmenší objem přenášených dat a z tohoto důvodu byla zvolena asynchronní komunikace. Jednotlivé měřicí stanice budou klienti, kteří budou přenášet data do centrální stanice, která představuje server. Klienti budou přenášet data jen v okamžiku, kdy na některé z měřících stanic dojde k detekci nového úniku pomocí některé metody. Centrální stanice bude založena na tom, že má k dispozici vždy všechna aktuální data ze všech stanic. Pro potvrzení tohoto předpokladu se bude periodicky dotazovat na informace o kvalitě spojení s jednotlivými stanicemi a v případě výpadku bude možné přerušit vyhodnocování detekce na centrální stanici, dokud nedojde k obnovení spojení. Tím by mělo dojít k minimalizaci objemu přenášených dat, což je žádoucí obzvláště pokud přenos dat byl zajištěn na základě mobilních sítí. V takovém případě je navíc i velmi žádoucí šifrovat komunikovaná data, abychom zvýšili zabezpečení přenášených dat o provozních stavech potrubí. Schéma návrhu komunikace je zobrazena na obr.3.2.



Obr. 3.2: Koncept komunikace měřících stanic s centrální

### 3.5 Centrální vyhodnocení úniků

Centrální vyhodnocování dat je založené na znalosti vzdáleností mezi jednotlivými stanicemi, znalostí rychlosti šíření tlakové vlny způsobené únikem v médiu a krátkodobém záznamu detekovaných úniků ze všech měřících stanic. Jak už bylo zmíněno, tak detekci budeme provádět jen v okamžiku, kdy některá ze stanic detekovala únik v časové oblasti.

Z těchto informací jsme schopni vypočítat čas, za který by tlaková vlna měla urazit vzdálenost mezi dvojicí měřících stanic. Na základě znalosti směru příchodu tlakové vlny a dále času potřebnému k tomu, aby tlaková vlna, která vznikla v místě dané měřící stanice, dorazila k dalším stanicím, můžeme vytvořit časový úsek, ve kterém bychom mělo být schopni najít únik na dané stanici.

Vzhledem k tomu, že detekce v časové i frekvenční oblasti mohou reagovat na různé podněty a jsou i vyhodnocovány rozdílně, může vzniknout časová prodleva mezi vyhodnocením oběma metodami. Za tímto účelem bude použit další časový úsek, který dovolí spolehlivě detekovat únik oběma metodami. V [5, Tian, s. 373], je uvedeno, že v ropovodech je doba trvání poklesu tlaku při úniku obvykle okolo 20 sekund, vzhledem k tomu, že navíc uměle navyšujeme tento čas zpožděním při zpracování dat, byla zvolena hodnota prodlevy mezi detekcí oběma metodami 30 sekund na

základě praktického zkoušení.

Pokud tedy došlo k detekci úniku v časové oblasti na některé ze stanic, určíme tuto stanicí jako tu, která je nejbližší úniku. Pro ověření toho, že se jedná o únik, budeme využívat stanice sousedící s touto. Pro tento účel určíme vzdálenost k okolním měřícím stanicím ve směru, ze kterého daná vlna přišla a s pomocí znalosti rychlosti šíření zvukové vlny v daném médiu jsme schopni dopočítat maximální potřebný čas pro detekci těmito stanicemi, který bude v případě detekce ve frekvenční oblasti navíc rozšířen o čas prodlevy mezi detekcí jednotlivých metod, abychom zohlednili obě metody detekce. Na dané stanici jsou také v daném časovém úseku akceptovány jen úniky, které vznikly ve směru ze kterého přišla vlna.

Pro stanice, které nejsou ve směru šíření vlny, nemůžeme omezit časový úsek, ve kterém budeme hledat úniky a jsme nuceni použít úsek odpovídající maximální vzdálenosti, ve které je kterákoliv stanice schopna detekovat nějaký únik. V tomto případě jsou obě vzdálenosti shodné, ale na potrubí s více stanicemi by byla tato vzdálenost omezena na základě empiricky získaných poznatků při zprovoznování.

Pro každou měřící stanicí, která by mohla únik detekovat, se následně procházejí záznamy o zachycených únicích detekovaných danou stanicí od nejnovějšího až po ty, které jsou na hranici prohledávané časové oblasti definované vzdáleností. Pokud na dané stanici nedojde k nalezení úniku, tato kontrola se tak bude opakovat v dalším cyklu úlohy PLC s novějšími daty (jsou-li dostupné), dokud nedojde k detekci a potvrzení úniku nebo dokud neuplyne časový úsek, ve kterém byl daný únik detekovatelný.

Pokud by byly k dispozici tři měřící stanice, bylo by pak možné přesně stanovit rychlost šíření vlny v daném médiu a tím efektivněji filtrovat výsledky. Pouze však za podmínky, že by bylo možné provést testovací únik zachytit všemi třemi stanicemi. Bohužel v tomto případě jsou k dispozici jen dvě měřící stanice, a tudíž jsme nuceni použít nejmenší rychlost z tabulkových hodnot (1200 m/s), abychom neodstraňovali skutečné úniky.

Pokud v průběhu vyhodnocování byl detekován únik alespoň jednou stanicí v časové oblasti a potvrzen dalšími dvěma metodami/stanicemi, dojde poté k vyhlášení úniku. Na základě následného testování citlivosti tohoto přístupu byla doplněna druhá varianta, kdy za předpokladu, že bude únik detekován dvěma různými stanicemi v časové oblasti, bude i v tomto případě vyhlášen únik. Tímto bylo možné významně zvýšit citlivost detekce.

Při návrhu centrálního vyhodnocování dat byla snaha navrhnout tento algoritmus tak, aby byl co nejuniverzálnější a tedy umožňoval snadnou úpravu i pro případy většího množství měřících stanic. Za tímto účelem bylo následné vyhodnocování vyhledávání úniků rozděleno, aby bylo možné lehce změnit požadavek na jiné kombinace v případě, že by to bylo žádoucí.

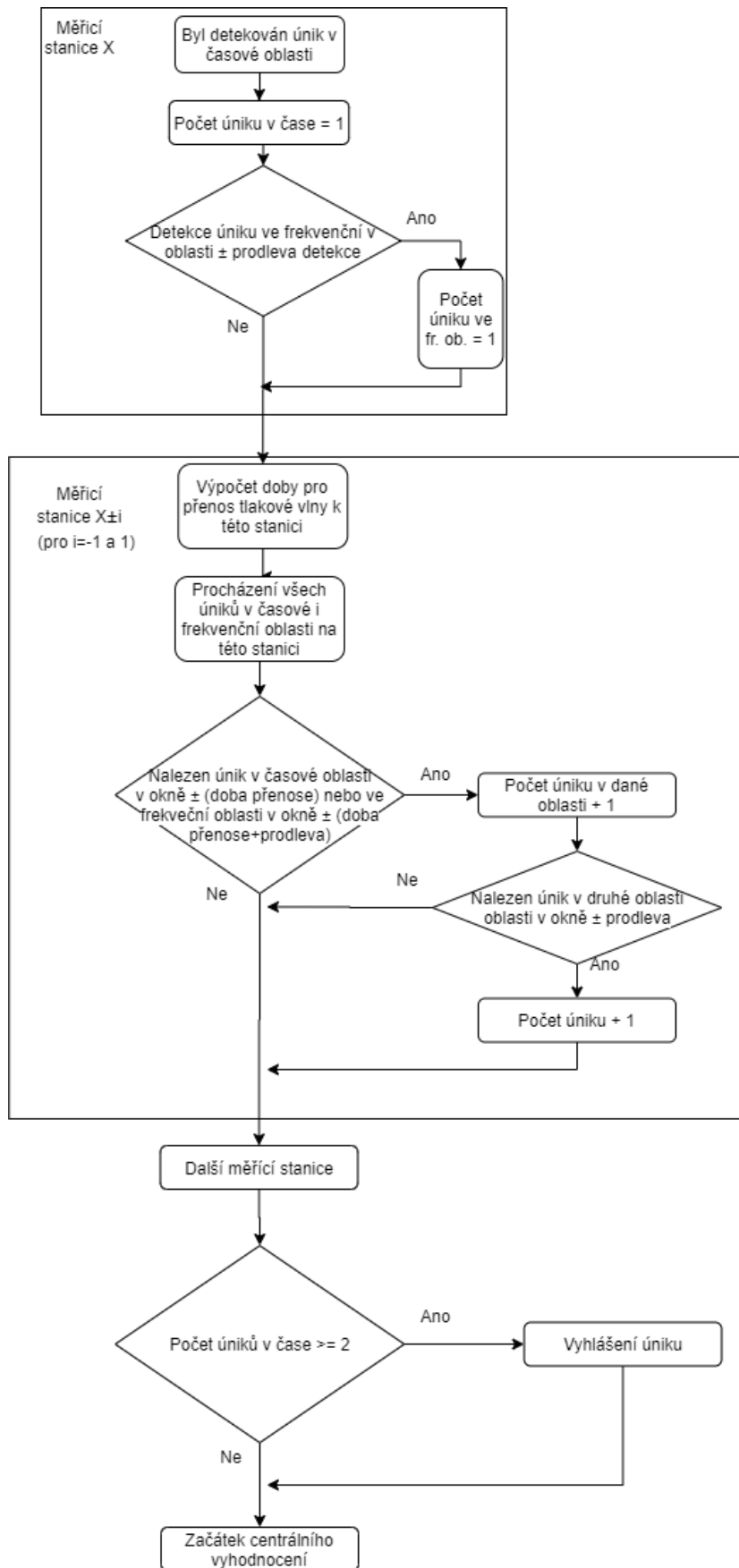
Zjednodušený vývojový diagram algoritmu pro vyhodnocení centrální stanicí je na obr.3.3. Pokud zohledníme to, že by provozovatel daného potrubí dostal informaci jen o tom, že došlo v daný čas k úniku, tak to pro něj bude mít jen částečný přínos, protože je stejně nucen najít přesné místo úniku, aby případný problém mohl řešit. Z tohoto důvodu byl algoritmus detekce dále rozšířen o určení i přibližného místa vzniku úniku. To je možné určit na základě toho, že známe přesné časy detekce jednotlivými stanicemi. To je možné z rozdílu času detekce dvou stanic a vzdálenosti mezi nimi. Pokud bude únik detekován oběma stanicemi ve stejný okamžik, vznikl tak daný únik uprostřed vzdálenosti mezi nimi, jinak dochází k posouvání na základě vypočítaného rozdílu a rychlosti šíření vlny v médiu. Výpočet je proveden dle vzorce 3.1, který je doplněn o to, aby výsledné místo detekce bylo vždy uvnitř monitorovaného úseku potrubí.

Z důvodu rozdílné citlivosti je vzdálenost počítána vždy jen z časů detekce pomocí jedné metody s tím, že preferovanější z metod je detekce v časové oblasti. Schopnost určení místa bohužel bude spolehlivě fungovat jen v případě, že při úniku detekovala každá stanice jen jeden únik. V opačném případě, kdy došlo k opakované detekci stejného úniku, nejsme schopni garantovat, že pro vyhodnocení počítáme místo úniku z identického projevu úniku, protože to nejsme schopni zjistit. Přesnost takto získaných výsledků, bude silně závislá na tom s jakou přesností je známa rychlost šíření tlakové vlny v médiu a schopnost detekce prvního projevu tlakové vlny v důsledku úniku.

$$l_{leak} = l_i + \left( \frac{l_{ij} - v \cdot t_{diff}}{2} \right) \quad (3.1)$$

kde

- $l_{leak}$ .....místo úniku [m]
- $l_i$ .....vzdálenost od počátku potrubí ke stanici  $i$  [m]
- $l_{ij}$ .....vzdálenost mezi stanicemi  $i$  a  $j$  [m]
- $v$ .....rychlost šíření tlakové vlny v daném médiu [m/s]
- $t_{diff}$ .....rozdíl času mezi detekcí stanicemi  $i$  a  $j$  [s]



Obr. 3.3: Zjednodušený algoritmus centrální stanice



## 3.6 Výsledky detekce

Za účelem ověření funkčnosti navrhovaného systému pro detekci úniků byla použita dvojice programovatelných automatů. Každý z nich představoval jednu měřící stanicí a vzhledem k tomu, že vyhodnocení úniků na centrální úrovni není v případě dvou měřících stanic tak náročné, tak jeden programovatelný automat současně bude představovat i centrální stanicí.

K tomu, aby bylo možné pro testování použít i historické záznamy, které máme k dispozici, byla přidána do každé měřící stanice simulační úloha. Ta nahradí skutečné analogové vstupy hodnotami v souboru při zachování vzorkovací frekvence a dále také zodpovídá za simulaci času odpovídajícímu historickým záznamům.

Když byl k dispozici nástroj, jak otestovat navržený systém pro detekci úniků, následovalo poté jeho vyzkoušení na dostupných datech. Jako výchozí hodnoty parametrů detekce byly použity ty, které se stanovily v předchozích krocích a za účelem dosažení co nejlepších výsledků, byly tyto parametry ještě dále laděny na základě dosahovaných výsledků.

Na základě průběžného vyhodnocování dosažených výsledků se ukázalo, že je vhodnější zvýšit citlivost všech metod na měřících stanicích a provést omezení dosažených výsledků při následném vyhodnocení na centrální úrovni. Toho bylo dosaženo snížením minimálního množství po sobě jdoucích vzorků při vyhodnocení v časové oblasti na hodnotu 800 vzorků a snížením prahu amplitudy ve frekvenční oblasti na 4,5.

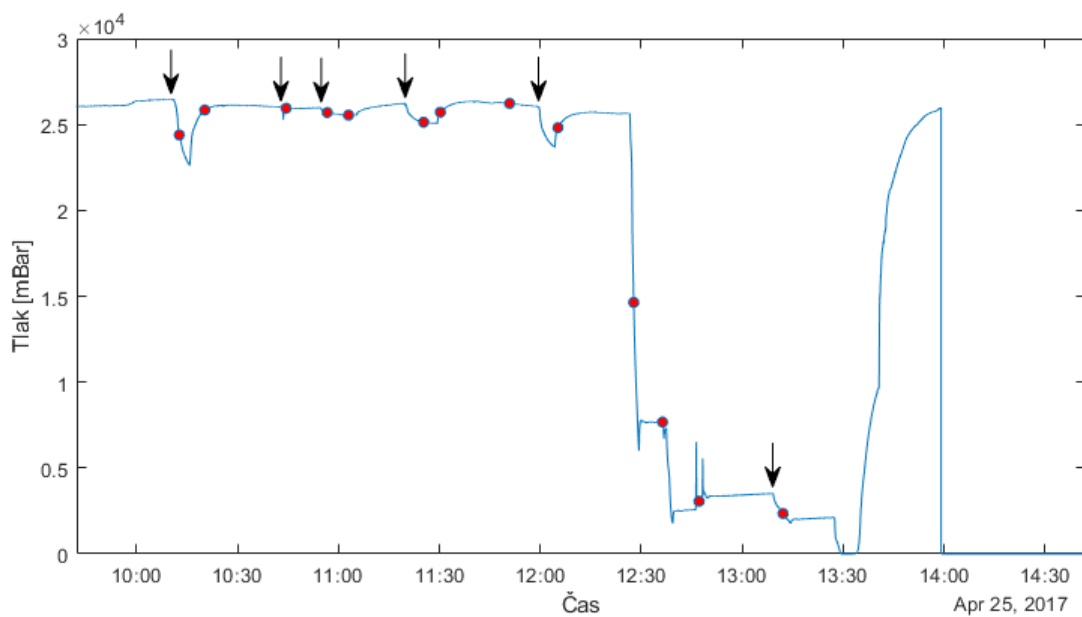
Při následném testování byly dosaženy následující výsledky uvedené v příloze B. Porovnáním s protokolem o testovacích pokusech lze vidět, že detekovaly většinu provedených testovacích úniků, ale současně lze vidět, že obsahují podstatně větší množství detekovaných úniků než jich bylo ve skutečnosti provedeno. Ty detekovaly velké množství deviací tlaku, které měly některé z rysů úniku.

Při centrálním vyhodnocování byla současně nasazena i modifikovaná varianta algoritmu navržená v Matlabu, ve které byl navíc zohledněn i vypočítaný korelační koeficient daného úniku. Konkrétně byl zohledněn tento koeficient jen u té stanice, která jako první detekovala daný únik. Tím bylo možné dosáhnout výsledků viz. tab 3.1, 3.2 a 3.3. Pro zobrazení v kontextu, byly vloženy tyto úniky do grafů tlaku viz. obr. 3.4, 3.5 a 3.6.

Pokud porovnáme tyto výsledky s těmi získanými při návrhu algoritmu v Matlabu, tak je patrné zvýšení citlivosti metody, kdy s výjimkou dat během druhého dne došlo ke zvýšení detekovaných úniků. Navíc bylo možné zachytit všechny úniky provedené během statického provozu potrubí. Při určování místa úniku nebyl vytvořený systém tolik úspěšný. Vzhledem k tomu, že detekce místa je přímo závislá na detekci úniku, nelze spolehlivě určit, jestli je chyba detekce místa způsobena nesprávným přiřazením projevu jednoho úniku z jednotlivých měřících stanic nebo jestli zde nemohlo

hrát nějakou roli i to, že snímače tlaku byly umístěny v menší vzdálenosti, než by bylo optimální. V důsledku toho nemuselo dojít ke správnému výpočtu korelačního koeficientu a v důsledku toho byly filtrovány i validní výsledky.

Při vyhodnocení dosažených výsledků musíme jako faktor zohlednit i to, jestli zdroj měření odpovídá běžnému provoznímu stavu potrubí. Data, která jsou k dispozici, pocházejí z pilotního programu, jehož cílem bylo otestovat úspěšnost detekce komerčních systémů detekce úniků založených na různých principech. Pro tento účel byl provoz potrubí modifikován za účelem vyzkoušení během všech možných provozních stavů. Díky tomu byl provoz podroben všem extrémním stavům, které v běžné potrubní přepravě nemohou nastat a pro systémy detekce úniků snižují úspěšnost detekce.

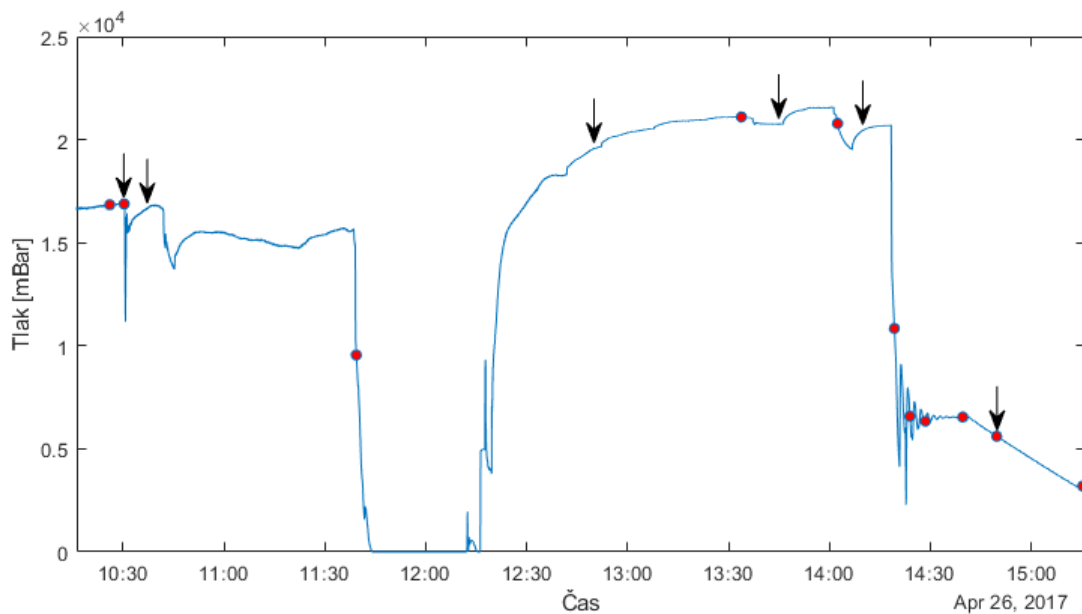


Obr. 3.4: Grafické zobrazení detekovaných úniků 25.04.2017 na datech ze stanice č.2

Čas úniku	Místo úniku [m]	Poznámka
10:12:40	56709	Test č.1 v 0 m
10:20:14	45165	
10:44:42	8703	Test č.1a v 4377 m
10:56:58	20073	Test č.2 v 4377 m
11:03:16	41889	Test č.2 v 4377 m
11:25:37	8097	Test č.3 v 4377 m
11:30:35	37977	Konec testu č.3
11:51:28	40005	
12:05:51	9873	Konec testu č.4 v 4377 m
12:28:23	34815	Odstavení čerpadel
12:36:57	67087	Odstavení čerpadel
12:48:05	11343	
13:13:03	38883	Test č.5 v 4377 m

Tab. 3.1: Centrální vyhodnocení detekce ze dne 25.4.2017

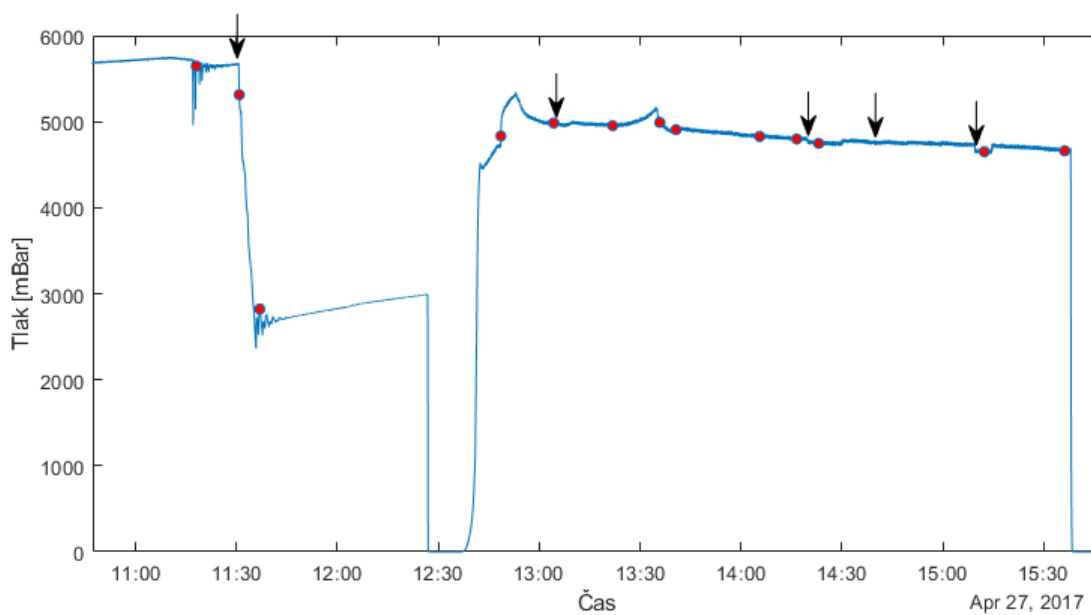
Kromě dat z ropovodu v Rumunsku máme také k dispozici i druhou sadu dat, kterou je možné použít. Tato druhá sada z Indie zachycuje běžný provozní stav ropovodu a neobsahuje žádné testovací úniky. Přesto bylo možné tyto data použít pro ověření toho, že navržený systém nevykazuje nadměrné množství falešně detekovaných úniků. K tomuto účelu nebyli nijak změněny parametry detekce a výsledkem bylo, že na záznamu zachycující týdně provoz nebyl systémem detekován žádný únik. To sice nemá žádnou vypovídající hodnotu o schopnosti detekce, ale současně nedošlo k detekci k falešných úniků.



Obr. 3.5: Grafické zobrazení detekovaných úniků 26.04.2017 na datech ze stanice č.2

Čas úniku	Místo úniku [m]	Poznámka
10:26:04	44787	
10:30:22	44787	Test č.6 v 17495 m
11:39:40	4557	Odstavení čerpadel
13:42:06	26805	Test č.9 v 42048 m
14:10:42	41661	Test č.10 v 42048 m
14:27:53	1167	Odstavení čerpadel
14:32:29	28713	
14:37:07	51849	
14:48:14	61893	
14:58:19	46077	Test č.11 v 42048 m
15:23:53	56373	Konec testu č.11

Tab. 3.2: Centrální vyhodnocení detekce ze dne 26.4.2017



Obr. 3.6: Grafické zobrazení detekovaných úniků 27.04.2017 na datech ze stanice č.2

Čas úniku	Místo úniku [m]	Poznámka
11:18:03	25155	
11:30:48	29619	Test č.16 v 42048 m
11:36:53	28359	Konec testu č.16
12:49:08	27021	
13:04:53	19917	Test č.12 v 67087 m
13:22:26	3171	
13:36:25	6711	
13:41:14	1203	
14:06:25	43263	
14:17:24	35955	
14:23:59	5049	Test č.14 v 42048 m
15:15:03	28485	Konec testu č.15 v 42048 m
15:37:24	23673	

Tab. 3.3: Centrální vyhodnocení detekce ze dne 27.4.2017



# Závěr

Cílem této práce bylo vytvoření základního přehledu existujících metod systémů pro detekci úniků v potrubní přepravě a snaha o navrhnutí nové metody. Ta vytvořená nová metoda vychází z dvojice stávajících, které jsou založené na měření tlaku. Konkrétně se jedná o metody Monitorování tlaku v měřícím místě a Detekce negativní tlakové vlny. Ty byly dále rozšířeny o určení směru příchodu detekovaného úniku v místě měření. Pro tento účel byly stanoveny podmínky nutné pro určení směru.

Prvním krokem při návrhu byla analýza dvojice souborů dat pomocí Matlabu, které zachycují širokou škálu přechodových dějů a současně i běžný provoz v potrubí. Tím bylo možné získat poznatky z analýzy v časové i frekvenční oblasti, které byly následně využity při návrhu algoritmu pro detekci v místě sběru dat (měřící stanici). Takto navržený algoritmus byl následně otestován pomocí dostupných záznamů a byla tak simulována každá měřící stanice. Tyto výsledky byly dále analyzovány a byl z nich navrhnout algoritmus pro vyhodnocení úniků na centrální úrovni. Těmito kroky bylo možné navrhnout základní koncept použitý pro detekci úniků na potrubí. Další část se zaměřovala na praktickou aplikaci navrženého systému. K tomuto účelu byla zvolena implementace do programovatelných automatů. Dále byly vytvořeny varianty připojení snímačů tlaku podle způsobu jejich připojení a použitých komunikačních protokolů. Pro správnou funkčnost navrženého systému je zapotřebí i zdroj přesného času. Za tímto účelem byly popsány nejčastěji používaná řešení, která se k tomuto účelu využívají. Následovaly provedené úpravy, které umožnily to, aby původní návrh pro detekci dat ze souboru bylo možné použít i pro průběžné vyhodnocení dat v reálném čase a především s použitým výpočetním modulem programovatelného automatu. K tomuto účelu bylo nutné původní návrh optimalizovat pro chod na programovatelných automatech, které mají výrazně menší výkon než běžné počítače.

Následně bylo navržené řešení vyzkoušeno na dostupných datech z obou zdrojů dat. V případě dat z Rumunska se podařilo úspěšně detekovat většinu pokusných úniků při minimálním počtu těch, které byly detekovány falešně.

V případě dat z Indie nebyl detekován žádný únik, protože se jednalo o data z běžného provozu, kde ani žádný testovací únik nebyl proveden. Nad rámec práce byl navržený systém doplněn i o detekci místa úniku. Při následném vyhodnocení nebyla ale detekce přesného místa úniku příliš úspěšná.

Na základě těchto výsledků můžeme říct, že navržený systém má potenciál k možnému budoucímu nasazení. Vzhledem k tomu, že je koncipován na nasazení pro potrubní přepravu, což je většinou kriticky důležitá infrastruktura, bylo by tak ještě zapotřebí systém otestovat na větším vzorku dat, aby byla spolehlivě potvrzena funkčnost navrženého řešení nebo případně zdokonalena. Díky tomu by mohla

být zvýšena i spolehlivost určení místa úniku, která bude při praktickém nasazení neméně důležitá.



# Literatura

1. *The History of Pipelines* [online]. 2016 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://pipeline101.com/The-History-of-Pipelines>.
2. FIEDLER, Jonathan. An Overview Of Pipeline Leak Detection Technologies. In: [online], s. 9 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://asgmt.com/wp-content/uploads/2018/03/102.pdf>.
3. *API RP 1130: Computational Pipeline Monitoring for Liquids*. 1st Edition. Washington D.C.: American Petroleum Institute (API), 2007.
4. STAFFORD, M; WILLIAMS, N. *Pipeline Leak Detection Study*. First edition. London: Health a Safety Executive, 1996. ISBN 0-7176-1167-1.
5. TIAN, Chun Hua; YAN, Jun Chi; HUANG, Jin; WANG, Yu; KIM, Dong-Sup; YI, Tongnyoul. Negative pressure wave based pipeline Leak Detection: Challenges and algorithms. In: *Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics* [online]. IEEE, 2012, s. 372–376 [cit. 2019-10-28]. ISBN 978-1-4673-2401-4. Dostupné z DOI: 10.1109/SOLI.2012.6273565.
6. KALUBU, Lawrence; KAIJAGE, Shubi; SINDE, Ramadhani. An overview of pipeline leak detection and location systems [online]. Roč. 2014, s. 5 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z DOI: 10.13140/2.1.4328.8327.
7. *Datasheet Wika Models IS-20-S, IS-21-S, IS-20-F, IS-21-F*. 2011. Dostupné také z: [https://www.wika.us/upload/DS\\_PE8150\\_en\\_us\\_16603.pdf](https://www.wika.us/upload/DS_PE8150_en_us_16603.pdf).
8. *Datasheet Keller Series 33 X, Series 35 X*. 2017. Dostupné také z: <http://www.keller-druck.com/picts/pdf/engl/33xe.pdf>.
9. VAKILINEJAD, Mohammad; XIA, Jiali; A-MAAMARI, Rashid S.; AL-RAWAHI, Nabeel; VAKILI-NEZHAAD, Gholamreza. *Density Correlation of Some Pure Hydrocarbons and Crude Oil Samples with the Speed of Sound*. ICMLEME'2014, 2014. Dostupné také z: [http://iieng.org/images/proceedings\\_pdf/1502E0114089.pdf](http://iieng.org/images/proceedings_pdf/1502E0114089.pdf).
10. *Engineering ToolBox: Velocity of Sound in gase* [online] [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: [https://www.engineeringtoolbox.com/speed-sound-gases-d\\_1160.html](https://www.engineeringtoolbox.com/speed-sound-gases-d_1160.html).
11. *Technical data X20IF1041-1* [online]. 2.03. vyd. 2020 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com/en/products/plc-systems/x20-system/x20-interface-module-communication/x20if1041-1>.

12. *CANopen – The standardized embedded network* [online]. c1992-2020 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://www.can-cia.org/canopen>.
13. *Technical data X20CP3585* [online]. 1.52. vyd. 2020 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com/en/products/plc-systems/x20-system/x20-cpus/x20cp3585/>.
14. WEBB, Chris. *Pearson Correlation in C* [online]. 2018 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.codedrome.com/pearson-correlation-in-c/>.
15. *Simply Modbus* [online]. 2019 [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: <http://www.simplymodbus.ca>.
16. *OPC Foundation: OPC UA* [online]. 2020 [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/>.

## Seznam symbolů, veličin a zkratek

<b>API</b>	American Petroleum Institut – Americký petrolejový institut
<b>RTTM</b>	Real Time Transient Model – Přechodový model v reálném čase
<b>Ex ia</b>	Intrinsic Safety – Jiskrově bezpečné
<b>Ex d</b>	Flameproof – Pevný závěr
<b>PLC</b>	Programmable logic controller – programovatelný automat
<b>STFT</b>	Short-time Fourier transform – Krátkodobá Fourierova transformace
<b>NTP</b>	Network Time Protocol - protokol pro synchronizaci času po síti
<b>RTOS</b>	Real-time operating system - operační systém reálného času



# Seznam příloh

A Protokol o testovacích pokusech	77
B Výsledky detekce	79
C Obsah přiloženého archivu	83



# **A Protokol o testovacích pokusech**

## Protokol o testovacích pokusech

Datum	Test	Vzdálenost [m]	Průměr potrubí [mm]	Planovaná doba úniku [min]	Typ	Počáteční tlak na Om [bar]	Konečný tlak na Om [bar]	Počáteční průtok na Om [m3/h]	Počáteční tlak na 67087m [bar]	Konečný tlak na 67087m [bar]	Čas začátku	Čas konce	Doba úniku [min]	Výška IBC [cm]	Objem IBC [m3]	Skutečný průměrný průtok [m3/h]	Míra úniku [% čerpání]
25/04/2017	1	0	otevřen 1/4 ventilu 2"	5	dynamic	-	-	94,71	26,43	13,00	10:10	10:15	5	-	-	-	-
	1a	4377	20	2	dynamic	0,0	26,0	93,50	26,03	13,80	10:43	10:45	2	-	0,06	1,8	1,93
	2		4	10	dynamic	26,0	26,0	93,77	25,97	13,80	10:55	11:05	10	37,75	0,41	2,46	2,62
	3		7	10	dynamic	26,2	25,0	93,74	26,02	13,80	11:20	11:30	10	92,87	1,05	6,3	6,72
	4		10	5	dynamic	26,5	24,0	93,00	26,20	14,60	12:00	12:05	5	92	1,04	12,48	13,42
	5		10	5	static	4,0	2,5	0,00	3,01	14,12	13:10	13:15	5	39,37	0,42	5,04	-
26/04/2017	6	17495	otevřít o 2 otočení 2 ventily 8"	7	dynamic	-	-	92,39	14,16	11,97	10:30	10:37	7	-	-	-	-
	7		otevřít o 2 otočení 1 ventil 8"	8	dynamic	-	-	92,62	16,78	11,80	10:37	10:45	8	-	-	-	-
	8	42048	4	30	dynamic	24,0	25,5	105,31	18,77	13,01	12:50	13:15	25	93	1,06	2,54	2,42
	9		7	10	dynamic	26,5	26,0	110,34	21,03	15,20	13:45	13:54	9	93	1,06	7,07	6,4
	10		10	5	dynamic	27,0	24,2	110,68	21,07	15,72	14:10	14:14	4	93	1,06	15,9	14,37
	11		4	35	static	17,5	14,3	0,00	6,42	17,20	14:50	15:22	32	94	1,065	2	-
27/04/2017	12	67087	otevřen 1/4 ventilu 2"	10	dynamic	-	-	128,73	5,01	2,60	13:05	13:15	10	-	-	-	-
	13	42048	4	20	dynamic	8,0	8,0	128,77	4,80	3,50	14:40	15:00	20	41	0,47	1,41	1,09
	14		7	10	dynamic	8,0	8,0	128,89	4,80	3,50	14:20	14:30	10	57	0,65	3,9	3,03
	15		10	5	dynamic	9,0	8,0	127,30	4,73	3,50	15:10	15:15	5	57	0,65	7,8	6,13
	16		10	5	static	16,5	13,5	0,00	5,23	15,35	11:30	11:35	5	79	0,91	10,92	-

**Poznám** - 1a se nepovažuje za test a neovlivňuje hodnocení. Událost představuje vyplnění simulační instalace různých průměrů vypouštěcích otvorů.



## B Výsledky detekce

Čas	Detekováno stanicí		Místo úniku [m]
	Čas. ob.	Fr. ob.	
10:11:56	2,3	2	6915
10:16:44	2,3	2	18057
10:21:07	2,3	-	28713
10:26:27	2,3	2	67087
10:44:42	2,3	-	8703
10:56:35	2,3	-	20073
11:01:42	2,3	-	40767
11:12:43	2,3	-	31821
11:24:55	2,3	-	8097
11:29:43	2,3	2	5235
11:51:39	2,3	-	40005
12:04:59	2,3	2	2397
12:22:53	2,3	-	12501
12:28:23	2,3	2	34815
12:36:01	2,3	-	24285
12:40:50	2,3	-	13791
12:48:05	3	2,3	11343
13:13:12	2,3	-	38883
13:27:01	2,3	2	16101
13:31:32	2,3	-	38973
13:41:06	2,3	2	56565
13:45:38	2,3	-	58611
14:00:29	3	2,3	28443

Tab. B.1: Centrální vyhodnocení detekce ze dne 25.4.2017

Čas	Detekováno stanicí		Místo úniku [m]
	Čas. ob.	Fr. ob.	
10:17:10	2,3	2	43311
10:26:04	2,3	2	44787
10:30:22	2,3	2	45867
10:42:08	2,3	2	62361
10:46:24	2,3	2	11181
10:51:00	2,3	-	12141
11:04:51	2,3	-	51855
11:10:22	2,3	2	12273
11:39:07	2,3	2	39189
11:43:36	2,3	-	28347
12:12:35	2,3	2	50661
12:41:10	2,3	2	44871
13:00:32	2,3	-	1209
13:41:55	2,3	-	26805
13:54:55	2,3	-	47187
14:09:21	2,3	-	48993
14:15:23	2,3	2	38847
14:27:15	2,3	2	49887
14:36:06	2,3	-	59655
14:48:14	2,3	-	61893
14:58:40	2,3	-	46077
15:22:57	2,3	-	41703

Tab. B.2: Centrální vyhodnocení detekce ze dne 26.4.2017

Čas	Detekováno stanicí		Místo úniku [m]
	Čas. ob.	Fr. ob.	
11:17:03	2,3	3	32067
11:30:42	2,3	3	30903
11:36:05	2,3	3	25155
12:09:34	2,3	-	29115
12:27:12	2,3	2,3	35649
12:38:11	2,3	3	33975
12:43:12	2,3	-	25803
12:49:08	2,3	-	27021
13:05:11	2,3	-	22905
13:22:36	2,3	3	27255
13:35:48	2,3	3	38451
13:40:32	2,3	3	35841
13:47:09	2,3	-	35715
14:06:25	2,3	3	43263
14:12:16	2,3	-	43155
14:17:24	2,3	3	35955
14:23:50	2,3	-	34461
14:30:51	2,3	3	32271
14:53:57	2,3	-	30993
15:03:36	2,3	-	32781
15:15:11	2,3	-	28485
15:25:59	2,3	-	30771
15:33:03	2,3	-	30063
15:37:41	2,3	-	23673

Tab. B.3: Centrální vyhodnocení detekce ze dne 27.4.2017



## C Obsah přiloženého archivu

V příloze jsou všechny programy a funkce, které byly vytvořené pomocí programu Matlab R2020a. Dále jsou přiloženy i data ze snímačů tlaku ropovodů v Rumunsku a Indii. Programy programovatelného automatu, jsou vytvořeny pomocí programu Automation Studio 4.2.13.102. V programovelných automatech byl použit operační systém Automation Runtime ve verzi D4.26. Dále byl použit kompilátor pro jazyk C ve verzi 4.1.2.

```
/ ..... kořenový adresář
├── matlab ..... soubory pro analýzu a detekci v Matlabu
│   ├── analyseCorr.m ..... funkce pro analýzu směru
│   ├── analyseSignal.m ..... funkce pro analýzu signálu tlaku
│   ├── detectionDir.m ..... funkce pro určení směru
│   ├── detectionFreq.m ..... funkce pro detekci ve frekvenční oblasti
│   ├── detectionTime.m ..... funkce pro detekci v časové oblasti
│   └── Main.m ..... hlavní program pro spuštění analýzy i detekce
├── data ..... složka s testovacími daty pro simulaci
│   ├── Indie ..... složka s daty z Indie
│   └── Rumunsko ..... složka s daty z Rumunska
├── plc ..... složka s programem pro programovatelný automat
└── detection.zip ..... archivní soubor s programem pro PLC
```