



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta Elektrotechnická**

**Katedra elektrických pohonů a trakce**

**Automatizované řízení soustavy paralelně spojených čerpadel využitím  
aplikačních funkcí frekvenčních měničů**

**Control of Parallel Connected Pumps fed by Frequency Converter**

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektrické pohony

Vedoucí práce: Ing. Radek Havlíček, Ph.D.

**Bc. Radan Krch**

**Praha 2022**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Krch** Jméno: **Radan** Osobní číslo: **456151**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Specializace: **Elektrické pohony**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Automatizované řízení soustavy paralelně spojených čerpadel využitím aplikačních funkcí frekvenčních měničů.**

Název diplomové práce anglicky:

**Control of Parallel Connected Pumps fed by Frequency Converter**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Popište technologické veličiny čerpadel a metody jejich řízení. Provedte rozbor metod regulace paralelně zapojených čerpadel.
- 2) Na didaktickém modelu tří čerpadel implementujte automatizované řízení s využitím aplikačních funkcí frekvenčních měničů.
- 3) Zpracujte koncepci monitorování procesních veličin čerpadlové soustavy.
- 4) Realizujte vizualizaci procesů na grafickém displeji, použijte vhodný komunikační protokol.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ATV600 Programming manual, Schneider Electric 2016
- [2] Cahier technique, Pump system user guide, Application Guide Schneider Electric 6/2008

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

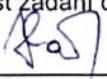
**Ing. Radek Havlíček, Ph.D., katedra elektrických pohonů a trakce FEL**

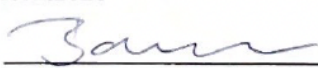
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **28.06.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **04.01.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **19.02.2023**

  
Ing. Radek Havlíček, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

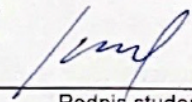
  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

15.12.2021  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací

V Praze dne .....

.....

podpis

## Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Ing. Jozefu Borzovi z firmy Schneider Electric za jeho rady a pomoc při práci na modelu řízení čerpadel a také mému vedoucímu práce Ing. Radku Havlíčkovi, Ph.D. za konzultace k této diplomové práci.

## Abstrakt

Cílem diplomové práce je vytvoření funkčního řízení paralelně zapojených čerpadel na dedikovaném modelu s výslednou realizací monitorování provozních stavů. Součástí práce je popis technologických veličin čerpadla a ztrát v potrubním systému. V diplomové práci jsou rozebrány metody řízení potrubního systému ovlivňováním vlastností potrubního systému i vlastností čerpadel. Řízení čerpadel je aplikováno pomocí frekvenčního měniče Altivar 630 od firmy Schneider Electric. V diplomové práci je uveden postup nastavování řízení paralelně zapojených čerpadel v programu SoMove. Zobrazování stavů veličin je provedeno podle vytvořené koncepce v programu Vijeo Designer. Monitorování veličin je vytvořeno tak, aby operátor obsluhující stroj, získal požadované informace o provozních stavech modelu.

## Klíčová slova

čerpadlo, frekvenční měnič, měrná energie, otáčková regulace, GUI, HMI

## Abstract

The goal of the diploma thesis is to create a parallel pump control with a GUI containing model states. In the thesis is included a description of a technological quantities and a pipe system losses. The diploma thesis discusses the methods of piping system control by influencing the properties of the piping system and the properties of the pumps. The pump control is applied on a converter Altivar 630 manufactured by Schneider Electric. In the diploma thesis is introduced a method for a setting the converter in the SoMove application for the parallel pump control. Graphical representation of quantities is done according to the created concept in the Vijeo Designer application. The GUI concept is created to give operators required information about model states.

## Key words

pump, frequency converter, Total Pressure Head, speed control, GUI, HMI

# Obsah

<b>1. Úvod</b> .....	<b>4</b>
<b>2. Definice čerpadla</b> .....	<b>5</b>
2.1. Dělení čerpadel.....	5
2.2. Hydrodynamická čerpadla.....	6
2.2.1. Radiální čerpadla.....	6
2.2.1.1. Konstrukce radiálního čerpadla .....	6
2.2.1.2. Princip radiálních čerpadel.....	7
2.2.2. Axiální čerpadla .....	7
2.2.2.1. Konstrukce axiálního čerpadla.....	8
2.2.2.2. Princip axiálního čerpadla.....	8
2.3. Hydrostatická čerpadla .....	8
2.3.1. Rotační hydrostatická čerpadla .....	8
2.3.1.1. Zubová čerpadla.....	9
2.3.1.2. Vřetenová čerpadla .....	9
2.3.2. Hydrostatická čerpadla poháněna kmitavým pohybem .....	10
2.3.2.1. Pístová čerpadla .....	10
2.3.2.2. Membránová čerpadla.....	10
<b>3. Charakteristika čerpadel</b> .....	<b>12</b>
3.1. Provozní charakteristika čerpadel .....	12
3.2. Charakteristika potrubního systému.....	12
3.3. Výkon čerpadel.....	13
3.4. Pracovní bod.....	15
3.4.1. Pohyb pracovního bodu.....	15
3.5. Použití tlakové nádoby .....	15
3.6. Kombinace čerpadel.....	16
3.6.1. Sériová kombinace čerpadel.....	17
3.6.1.1. Sériově řazená čerpadla ve stejné geodetické výšce .....	17
3.6.1.2. Sériově řazená čerpadla v různé geodetické výšce .....	18
3.6.2. Paralelní kombinace čerpadel.....	18
3.7. Tlakové řízení čerpadel .....	19
3.8. Otáčkové řízení čerpadel .....	21
3.9. Řízení průtoku čerpadlem s konstantními otáčkami .....	22
3.9.1. Regulace průtoku škrcením.....	23
3.9.2. Regulace průtoku obtokem.....	23
<b>4. Frekvenční Měníč Altivar 630</b> .....	<b>25</b>
4.1. Koncept zapojení měničů a čerpadel.....	27

4.1.1. Zapojení s více měniči.....	27
4.1.2. Zapojení s jedním měničem .....	28
4.2. Ovládání přes Web Server.....	28
4.3. Ovládání přes terminál .....	28
4.4. Ovládání přes program SoMove.....	29
4.4.1. Postup nastavení řízení přes SoMove.....	30
4.4.1.1. Nastavení parametrů čerpadla.....	30
4.4.1.2. Nastavení PID regulátoru.....	31
4.5. Booster Control .....	32
4.6. Sleep/Wake up.....	34
4.7. Detekce malého průtoku.....	34
<b>5. Komunikační protokol .....</b>	<b>35</b>
5.1. TCP/IP .....	35
5.1.1. Vrstvy TCP/IP protokolu .....	35
5.2. Komunikační protokol Modbus.....	35
5.3. Modbus RTU.....	35
5.4. Modbus TCP/IP.....	36
<b>6. Monitorování procesních veličin .....</b>	<b>37</b>
<b>7. Program Vijeo Designer.....</b>	<b>39</b>
7.1. Funkce programu Vijeo Designer .....	39
7.2. Grafické panely .....	39
7.3. Funkční prvky.....	40
7.4. Proměnné v programu Vijeo Designer.....	40
7.5. Možnosti práce s objektem v programu Vijeo Designer .....	41
7.6. Práce programu na pozadí .....	41
7.7. Komunikace programu Vijeo Designer.....	41
7.8. Skripty v programu Vijeo Designer .....	42
<b>8. Model řízení paralelně zapojených čerpadel .....</b>	<b>44</b>
8.1. Nastavení měniče pro řízení čerpadel .....	45
8.1.1. Zadání štítkových hodnot a autotuning .....	45
8.1.2. Nastavení PI regulátoru v programu SoMove.....	46
8.1.3. Nastavení Booster Control .....	47
<b>9. Monitorování procesů v programu Vijeo Designer.....</b>	<b>49</b>
9.1. Panel sledování tlaku a průtoku.....	49
9.2. Panel zobrazující stavy stykačů.....	50
9.3. Panel zobrazující frekvenci napětí .....	51
9.4. Informační panel.....	51

9.5. Panel zobrazující charakteristiky čerpadel .....	52
<b>10. Závěr .....</b>	<b>55</b>
<b>11. Přílohy .....</b>	<b>57</b>
I. Fotografie modelu řízení čerpadel .....	57
II. Tabulka použitých parametrů měniče v programu Vijeo Designer a jejich adresy .....	60
<b>Použité zdroje.....</b>	<b>61</b>



## 1. Úvod

Nedílnou součástí budov a domácností jsou vodovodní rozvody. Proto, aby byla zajištěna dodávka vody je nutné ji dostat z bodu A do bodu B, často v různých výškových rovinách. Dříve byly zdrojem vody pouze přírodně vytvořené toky. Později byly vyvinuty stroje, které dokázaly vodu odčerpávat na místa mimo dosah vodních zdrojů. Jedním takovým typem je například Archimédův šroub, který je známý jako jeden z nejstarších typů čerpadel. Postupem času rostla potřeba zásobování vodou více a více, tak bylo nutné zajistit dodávky, a proto se začaly stavět vodohospodářské stavby, například vodárny nebo studny. Dříve šlo pouze o jednoduché samospádové vodárny. Buď byl samospád přirozený nebo se voda musela načerpat do vodárenských věží. K načerpání vody do věží nebo ze studny bylo samozřejmě nutné použití čerpadla. Byly použity starší typy čerpadel například zmiňovaný Archimédův šroub. První typy čerpadel byly poháněné lidskou silou, později byla vyvinuta čerpadla poháněná párou. V dnešní době jsou ovšem čerpadla nejčastěji poháněná elektrickým motorem. Nejčastějšími motory pohánějící čerpadla jsou asynchronní motory. Tento typ motorů je výhodný z hlediska jednoduchosti konstrukce i jejich spolehlivosti. Další výhodou je snadné ovládání u neřízených soustav. Ovšem oproti stejnosměrným cize buzeným motorům jsou asynchronní motory složitější na regulaci. Tak asynchronní motory zůstávají na většině míst pouze v režimu vypnout-zapnout.

Řešení problému s řízením asynchronních motorů se objevilo s příchodem výkonových spínacích prvků. První frekvenční měniče byly uvedeny na trh v 60. letech 20. století. Frekvenční měniče se od této doby stále vyvíjejí a rozšiřuje se jejich škála funkcí, ačkoli základní princip zůstává stejný. Nové frekvenční měniče umožňují zpracovávání signálů a obsahují ty nejpokročilejší metody řízení. Tím je možné aplikovat řízení čerpadel, které splní nejrůznější požadavky na soustavu jako je například úspora energie nebo udržování požadovaného tlaku systému při různých požadavcích na spotřebu. Například v bytovém domě musí být voda dodávána pod stejným tlakem v noci, kdy není prakticky žádná spotřeba, a během dne, kdy se lidé sprchují nebo jsou spuštěny zařízení spotřebovávající vodu.

Tato diplomová práce se zabývá řízením paralelně zapojených čerpadel a aplikací funkcí frekvenčního měniče Altivar 630 od firmy Schneider Electric na didaktickém modelu s monitorováním procesních stavů modelu. Cílem této diplomové práce je:

- popsat technologické veličiny čerpadel a metody jejich regulace.
- aplikovat funkce řízení frekvenčního měniče Altivar 630.
- realizace monitorování veličin systému a stavů modelu.

Cílem této práce není:

- analýza ztrát potrubního systému.
- výpočet regulačních koeficientů.

## 2. Definice čerpadla

Čerpadlo je stroj, který pomocí mechanického pohybu umožňuje přemísťování kapaliny nebo sypkých materiálů. Předávání energie je zajištěno buď pomocí rotačního pohybu, nebo pomocí přímého působení síly na kapalinu pracovním prvkem čerpadla.

Čerpadla se využívají pro:

- Přesun materiálů nebo kapaliny do větších výšek.
- Získání požadovaného tlaku.
- Získání požadované rychlosti proudění kapaliny.
- Kompenzaci ztrát třením.

### 2.1. Dělení čerpadel

Čerpadla lze rozdělit do několika skupin. Nejčastěji se rozdělují na hydrostatické a hydrodynamické. Jejich odlišnost spočívá právě ve způsobu předávání energie ze zdroje otáčení do kapaliny. Existují i další typy čerpadel, které do žádné z jmenovaných nebo uvedených skupin.

U hydrodynamický čerpadel je dodávaný výkon čerpadlu definován vztahem:

$$P_m = M\omega, \quad (1)$$

kde

$M$  ... je moment hydraulických sil [Nm]

$\omega$  ... je úhlová rychlost rotoru [ $\text{rads}^{-1}$ ] [1]

Hydrostatická čerpadla pracují na jiném principu a jejich výstup je ve formě posuvného pohybu. Výstupní výkon je dán vztahem:

$$P_m = Fc, \quad (2)$$

kde

$F$  ... je síla kapaliny, která působí na pracovní prvek [N]

$c$  ... je rychlost pracovní prvku [ $\text{ms}^{-1}$ ] [1]

## 2.2. Hydrodynamická čerpadla

Hydrodynamická čerpadla jsou pravděpodobně nejrozšířenějším typem čerpadel. Jejich činnost spočívá na působení odstředivé síly. Hydrodynamická čerpadla jsou typ čerpadel, který má velmi široké využití, například v chladících věžích nebo také v domácnostech jako součást vodárny. [2]

Čerpadla používající odstředivou sílu jsou vhodná pro velké průtoky. Konstrukce těchto strojů je vhodná pro tekutiny malé hustoty. Příkladem tekutiny s malou hustotou je například obyčejná voda. Pro tekutiny s větší hustotou nebo pro sypké materiály jsou naopak vhodnější hydrostatická čerpadla. Pokud byla použita hydrodynamická čerpadla na tekutiny s větší hustotou hydrodynamická čerpadla, bylo by nutné zvýšit výkon. [2]

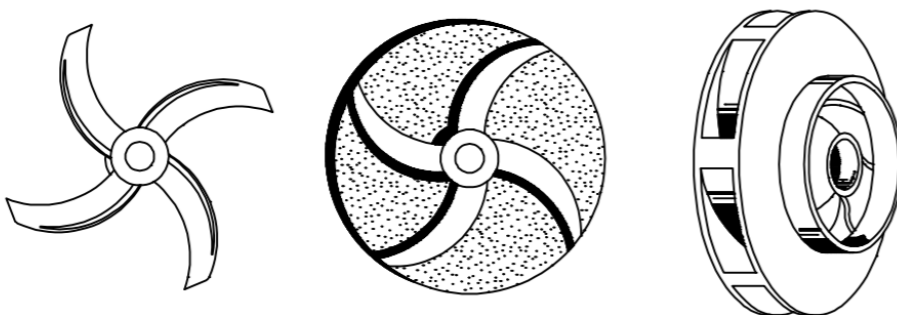
Tento typ je vhodný pro kontinuální pohyb. Časté spínání a vypínání není pro hydrodynamická čerpadla vhodný. Vzhledem k jeho konstrukci není možné přesné dávkování kapaliny. [2] Hydrodynamická čerpadla se mohou lišit typem své konstrukce. Hlavním rozdělení hydrodynamických čerpadel je na radiální a na axiální.

### 2.2.1. Radiální čerpadla

Radiální hydrodynamická čerpadla patří mezi nejvíce rozšířený druh všech čerpadel. Tento typ čerpadel je běžný například u vodovodních rozvodů budov. Důvodem jejich rozsáhlého využití je jednoduchost používání a spolehlivost.

#### 2.2.1.1. Konstrukce radiálního čerpadla

Hlavními částmi radiálního čerpadla jsou oběžné kolo se zahnutými lopatkami, vnější kolo s lopatkami zahnutými do požadovaného směru toku tekutiny, kostra s rozšiřujícím průměrem respektující množství tekutiny. Radiální čerpadla se mohou dělit podle typu oběžného kola, počtu vstupních nebo výstupních proudů. Typy oběžných kol se dělí podle otevřenosti oběžného kola, tak

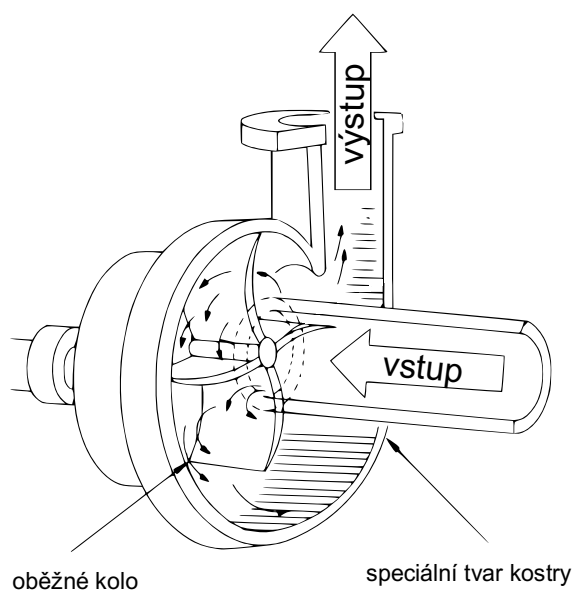


Obr. 1 Ukázka radiálního kola otevřeného, polozavřeného a uzavřeného [2]

jako je to zobrazeno na obr. 1. Uzavřená kola se vyskytují v čerpadlech ve vodovodních systémech a otevřená kola například v čerpadlech malých výkonů v jednotkách W.

### 2.2.1.2. Princip radiálních čerpadel

Princip hydrodynamických čerpadel spočívá v přeměně mechanické energie pohonu čerpadla na kinetickou energii tekutiny. [3] Po roztočení oběžného kola se tekutina, následkem odstředivé síly, uvede do pohybu. Oběžné kolo, včetně potrubního systému, musí být ponořeno v kapalině už v době rozběhu, jinak by čerpadlem nemusel být vytvořen potřebný podtlak pro překonání výškového rozdílu mezi oběžným kolem a hladinou kapaliny.



Obr. 2 Ukázka radiálního čerpadla [2]

Mechanická energie je předána tekutině ve formě kinetické energie. Při odstředivém pohybu tekutiny je uprostřed kola snížen tlak. Díky sníženému tlaku je umožněno další nasávání tekutiny ze zdroje. Po zpomalení kapaliny je kinetická energie přeměněna na jinou formu energie (potenciální nebo tlakovou). [2]

### 2.2.2. Axiální čerpadla

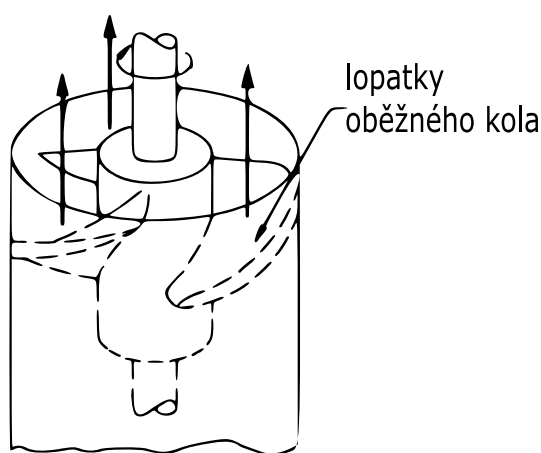
Tento typ čerpadel bývá nazýván také jako lopatková čerpadla. U tohoto typu čerpadel kapalina vstupuje i vystupuje jedním směrem. Axiální čerpadla se používají pro přenos velkého množství kapaliny do malých výšek. [4]

### 2.2.2.1. Konstrukce axiálního čerpadla

Konstrukce axiálního čerpadla je jednodušší než u radiálního typu. Axiální čerpadlo je tvořeno oběžným kolem s lopatkami, které jsou speciálně zahnuté pro zvýšení účinnosti přenosu energie. Na oběžném kole bývá umístěno 2-6 lopatek, které lze otáčet podle potřeb požadovaného výkonu.

### 2.2.2.2. Princip axiálního čerpadla

Princip axiálního čerpadla je velmi podobný jako u radiálních čerpadel. Otáčivé lopatky přenášejí kinetickou energii tekutině. Při pohybu tekutiny od čerpadla se vytváří podtlak, který způsobí nasávání další kapaliny do turbíny.



Obr. 3 Ukázka oběžného kola axiálního čerpadla s naznačeným směrem toku kapaliny [2]

## 2.3. Hydrostatická čerpadla

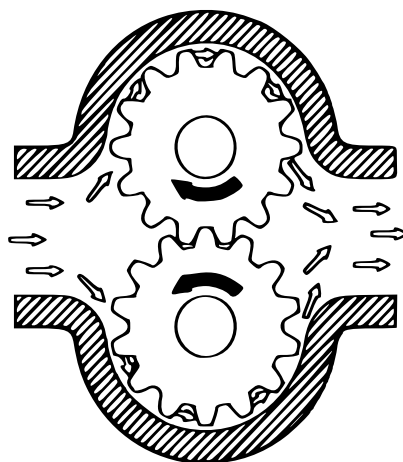
Hydrostatická čerpadla převádějí kinetickou energii přímo na energii tlakovou. Hydrostatické čerpadlo je velmi ztrátové, proto jsou kladeny velké požadavky na přesnost při výrobě a četnost údržeb. [5] Tento typ čerpadel zahrnuje mnoho variant. Nejčastější dělení je na rotační čerpadla a na čerpadla s kmitavými pohybem

### 2.3.1. Rotační hydrostatická čerpadla

Rotační hydrostatická čerpadla nepředávají energii kapalině odstředivou silou, ale přímo tlakovou silou vytvořenou otáčivou částí čerpadla. Pracovní prostor je těsněn pracovními prvky, což mohou být například zuby nebo lamely. Množství kapaliny je vždy stejné nezávisle na výšce. [5] Rotační hydrostatická čerpadla se dělí podle typu rotačního komponentu, tedy zuby, vřetena, lamely.

### 2.3.1.1. Zubová čerpadla

Zubová čerpadla se používají zejména v hydraulických obvodech. Jejich nespornou výhodou je jednoduchá výroba, spolehlivost a konstrukce. Dají se využít pouze pro malé průtoky. [2] Uvnitř zubového čerpadla jsou dvě ozubená kola. Jedno kolo je hnací a druhé poháněné. Kola musí být umístěna tak přesně, že nepropustí kapalinu v prostoru mezi ozubenými koly, ani v prostoru mezi koly a kostrou stroje. Při pohybu kol jsou jednotlivé komory mezi zuby a kostrou naplněné kapalinou, která je poháněna dále do potrubního systému. [2]

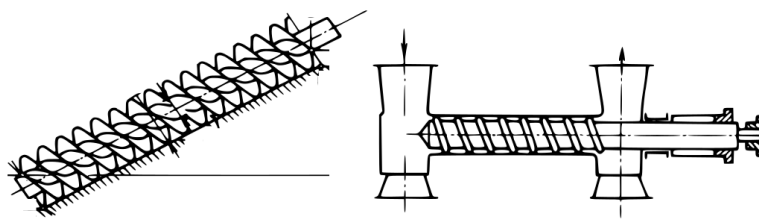


Obr. 4 Princip zubového čerpadla [2]

### 2.3.1.2. Vřetenová čerpadla

Tato čerpadla se používají v oblasti, kde je potřebný velký průtok a tekutina má vysokou viskozitu. Vřetenová čerpadla mají využití například v potravinářském průmyslu pro dopravu tekutin, nebo se také používají jako ponorné čerpadlo pro úzké vrty. [2]

Vřetenové čerpadlo funguje na principu otáčení šroubovitě hřídele. Hřídel při svém otáčení dokáže zadržet určité množství vody, které je dopraveno do místa určení. Nejčastější konstrukce je tzv. Archimédův šroub.



Obr. 5 Příklad konstrukce vřetenového čerpadla [6]

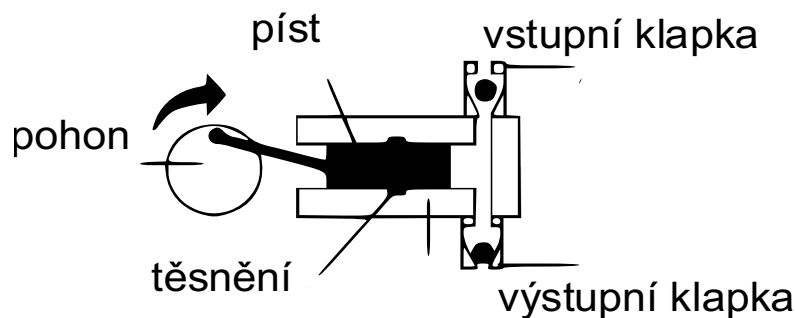
### 2.3.2. Hydrostatická čerpadla poháněna kmitavým pohybem

Tento typ čerpadel pracuje na principu nasávání kapaliny s následným vysokotlakým vytlačněním. Do této kategorie se řadí pístová a membránová čerpadla. Základní řady tohoto typu čerpadel dokážou vygenerovat tlak až 700 barů. [2]

#### 2.3.2.1. Pístová čerpadla

Pístová čerpadla se používají pro malé objemové průtoky a velké tlaky. Mají široké využití od potravinářského průmyslu po stavebnictví. Jejich využití je pro vysokotlaké systémy a také pro přesné dávkování materiálu. Nevýhodou je nutná údržba těsnění a pulsující průtok. [5]

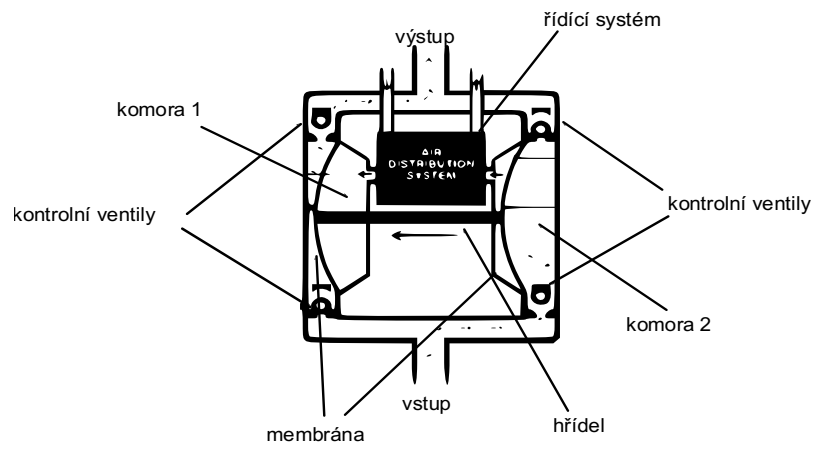
Pístová čerpadla fungují na principu nasávání kapaliny ze sacího prostoru a poté její vytlačení do výtlačného prostoru. [5] Jak název tohoto čerpadla napovídá, pístová čerpadla mají pracovní píst, který pracuje v uzavřené komoře. V prvním kroku je píst zvednut pracovním mechanismem a kapalina je nasáta do pracovní komory ze sacího prostoru. V této fázi je odvod kapaliny do výtlačného prostoru uzavřen. Ve druhém kroku je odvod ze sacího prostoru uzavřen a odvod do výtlačného prostoru otevřen. Při zpětném pohybu pístu je kapalina vytlačena do potrubního systému.



Obr. 6 Příklady konstrukce vřetenového čerpadla[1]

#### 2.3.2.2. Membránová čerpadla

Membránová čerpadla jsou odolnější z pohledu opotřebení vlivem pevných částic v médiu. Proto jsou membránová čerpadla využívána v oblastech, kde by docházelo k poškození jiných typů čerpadel. [5] Membránová čerpadla obvykle obsahují dvě pracovní komory, které pracují v opačných cyklech. Princip je stejný jako u pístových čerpadel – kmitavý pohyb membrány umožňuje nasávání a vytlačování tekutiny. Pohyb membrány je vytvořen tlakem v komoře mezi membránami. Membránová čerpadla nepotřebují zdroj mechanické energie. Jejich funkce je závislá pouze na dodávaném tlaku do prostoru mezi membránami. Mechanismus čerpadla umožňuje řízení bran přívodů podle pohybu membrán.



Obr. 7 Popis membránového čerpadla [16]



### 3. Charakteristika čerpadel

Pro práci s čerpadly je nutné znát jejich provozní vlastnosti a oblasti jejich použití. Čerpadla by měla během chodu pracovat s maximální účinností. Jedním z hlavních parametrů, pro které se volí typ čerpadla je objemový průtok a ztráty v potrubním systému.

#### 3.1. Provozní charakteristika čerpadel

Provozní charakteristika čerpadla udává měrnou energii  $Y$ , kterou je možné vyprodukovat pomocí čerpadla v závislosti na objemovém toku. Měrná energie se označuje také jako  $H$  (Head) nebo  $TPH$  (Total Pressure Head). Měrná energie je dána rozdílem energií na vstupní a výstupní části čerpadla. Možnost, jak vypočítat měrnou energii dodanou čerpadlem je podle následující rovnice. [6]

$$Y = sh + dh + j(s + d) + op, \quad (3)$$

kde

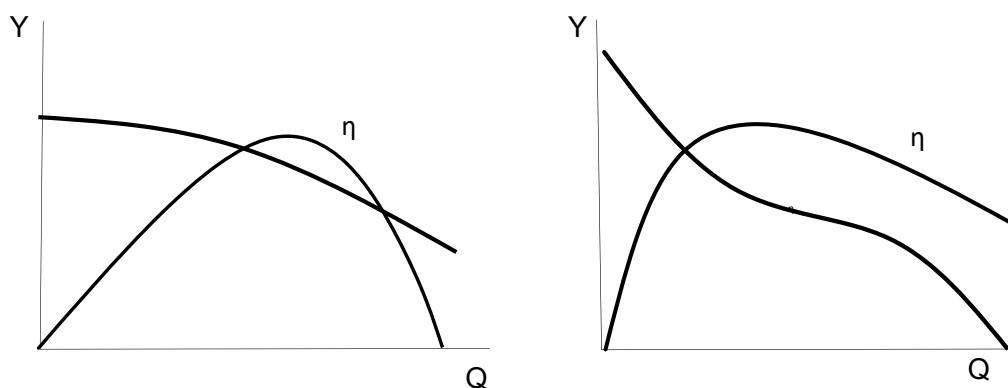
$Y$  ... je měrná energie [ $\text{J kg}^{-1}$ ]

$sh$ ...je výška mezi hladinou zásobníku vody a středem oběžného kola čerpadla [m]

$dh$ ...je výška mezi středem oběžného kola čerpadla a zásobníkem načerpané vody [m]

$j(s+d)$  ...jsou ztráty potrubního systému před a za čerpadlem [ $\text{J kg}^{-1}$ ]

$op$ ... je pracovní tlak [ $\text{Pa m}^3\text{kg}^{-1}$ ]



Obr. 8 Pracovní charakteristiky a závislosti účinnosti na objemovém průtoku axiálního čerpadla (vlevo) a radiálního čerpadla (vpravo) [6], [7]

#### 3.2. Charakteristika potrubního systému

Charakteristika potrubního systému je závislá na výškovém rozdílu počáteční a koncové úrovně systému a celkových ztrátách v systému. [6] Celkové ztráty jsou způsobené třením a změnou směru proudu v potrubí. [3] Pokud je systém řízen škrcením nebo obsahuje zařízení vytvářející

podtlak, ztráty systému se zvyšují. [6] Celkovou měrnou energií lze také vyjádřit Bernoulliho rovnici, která obsahuje prvek vyjadřující ztráty ve vodovodním systému. Rovnice se skládá ze dvou částí. První částí jsou členy, které vyjadřují statickou energii. Tyto členy jsou nezávislé na množství průtoku v systému. Druhou částí je člen vyjadřující ztráty v potrubním systému, které jsou závislé na rychlosti proudění tekutiny v potrubí.

$$Y = gH + \frac{p_2 - p_1}{\rho} + \sum \xi \frac{c^2}{2}, \quad (4)$$

kde

$H$ ... je geodetická výška [m]

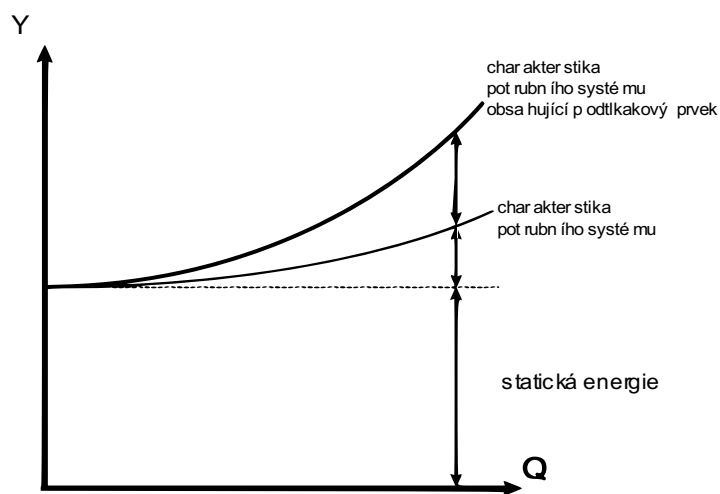
$p_1$  a  $p_2$  ... jsou tlaky v počítaných místech systému [Pa]

$\rho$ ... je hustota tekutiny [ $\text{kgm}^{-3}$ ]

$g$ ... je tíhové zrychlení [ $\text{ms}^{-2}$ ]

$\sum \xi$  ... je suma ztrát v systému [J]

$c$ ... je rychlost tekutiny [ $\text{ms}^{-1}$ ]



Obr. 9 Charakteristika potrubního systému [7]

### 3.3. Výkon čerpadel

Dalším sledovaným provozním parametrem čerpadel je jejich výkon. Výkon čerpadel je definován jako užitečný výkon přenesený z hřídele do pracovní tekutiny. Užitečný výkon je dán účinností stroje tedy:

$$P_{\zeta} = \eta P_m = \rho g Y Q, \quad (5)$$

kde

$P_{\varepsilon}$  ... je užitečný výkon předaný tekutině [W]

$\eta$  ... je účinnost čerpadla [-]

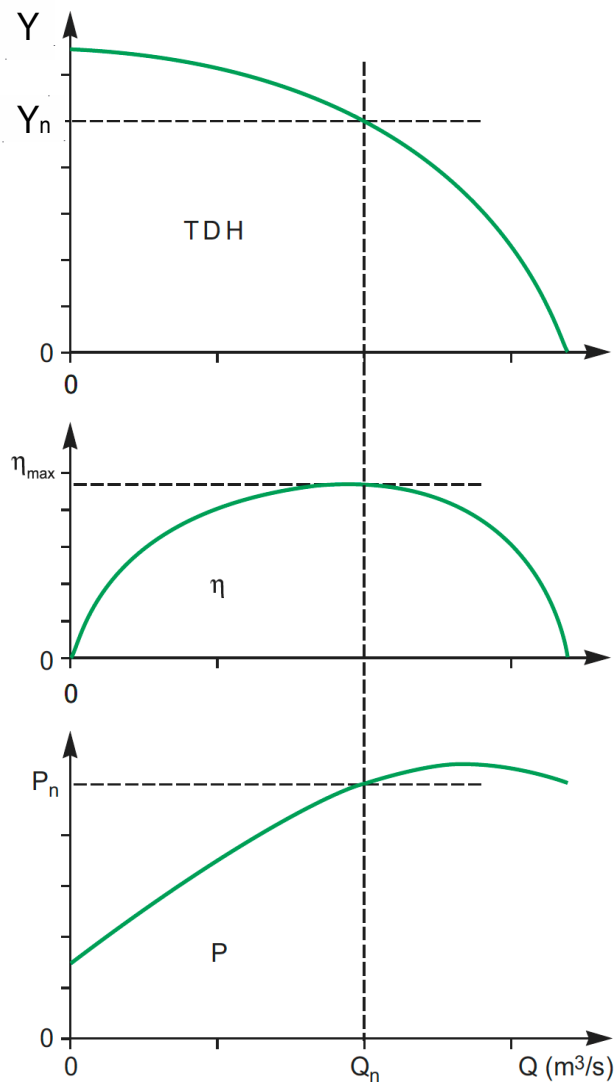
$P_m$  ... je mechanický výkon [W]

$\rho$  ... je hustota tekutiny [ $\text{kgm}^{-3}$ ]

$H$  ... je výška mezi hladinami úrovní před a za čerpadlem[m]

$Q$  ... je průtok [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ] [7]

Na následujícím obrázku je zobrazen typický průběh mechanického výkonu čerpadla v porovnání s charakteristikami měrné energie a účinnosti. Charakteristiky jsou zobrazeny pro hydrodynamická radiální čerpadla. Z průběhu účinnosti vyplývá její závislost na průtoku. Tedy pokud čerpadlo neuvádí kapalinu do pohybu, je účinnost nulová a užitečný výkon je také nulový. Charakteristika výkonu není závislá jen na průtoku. Záleží dále i na velikosti a charakteru ztrát v systému. [7]



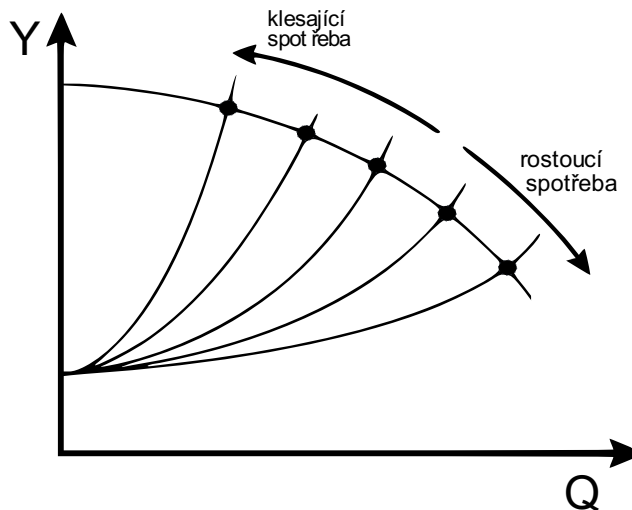
Obr. 10 charakteristiky čerpadla s vyobrazeným bodem nejvyšší účinnosti

### 3.4. Pracovní bod

Pracovní bod čerpadla se nachází v místě protnutí charakteristiky čerpadla a charakteristiky potrubního systému. Pracovní bod je tedy možné změnit upravením parametrů čerpadla nebo potrubního systému. [6]

#### 3.4.1. Pohyb pracovního bodu

Pracovní bod, jak už bylo uvedeno, se nachází v bodě protnutí charakteristik čerpadla a potrubního systému. Tomuto bodu odpovídá určitý průtok a tlaková energie. Pokud je čerpadlo zvoleno pro potrubní systém, kde je potřeba konstantní průtok a tlak, je možné použití čerpadla bez přídavných komponentů a řízení. Při popisu charakteristik bude uvažováno pouze použití radiálního čerpadla, jakožto nejpoužívanějšího typu. U vodovodních systému například v kancelářských budovách nebo v bytových domech není možné zajistit konstantní objemový průtok a tlak.



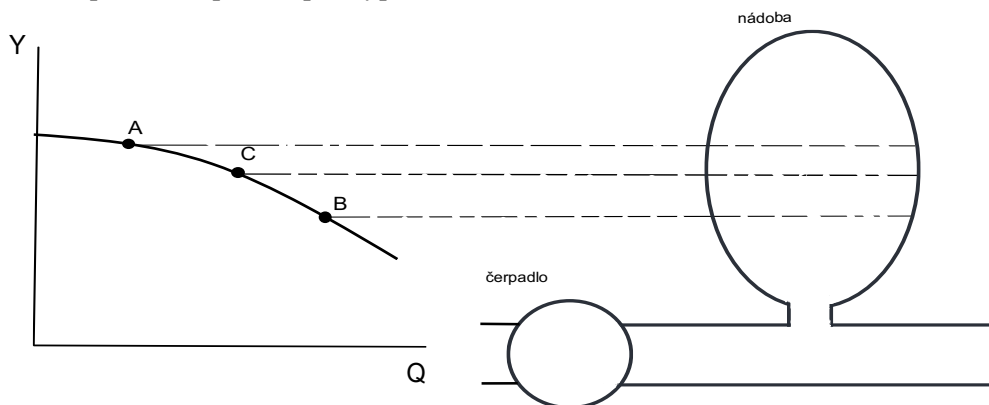
Obr. 11 Vyznačené pracovní body radiálního čerpadla a vodovodního systému s různou spotřebou [7]

### 3.5. Použití tlakové nádoby

Pro omezení počtu spínání čerpadla je možné použít tlakovou nádobu. Použití tlakové nádoby má řadu výhod. První výhodou je udržení tlaku v momentu, kde je čerpadlo vypnuté. Další využití spočívá v použití tlakové nádoby jako zásobárny vody. Tlaková nádoba také snižuje vliv tlakových nárazů při spouštění a vypínání čerpadla. [6]

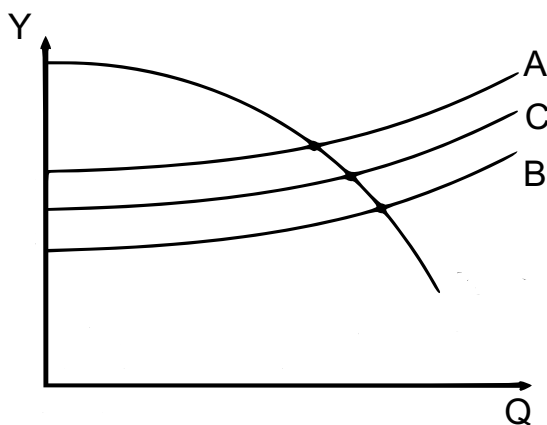
Princip funkce čerpadla s tlakovou nádobou lze popsat pomocí obrázku 12. Čerpadlo je na počátku cyklu vypnuté a hladina vody v nádobě je na úrovni A. Při otevření kohoutku dochází ke snížení tlaku a voda v nádobě poklesne na úroveň C. V této úrovni se spíná čerpadlo a hladina se

ustálí na hladině B. Po uzavření kohoutku je čerpadlo stále sepnuté a hladina v nádobě dosáhne zpět na hladinu A, pak se čerpadlo opět vypne. [6]



Obr. 12 Pracovní body s body vyznačující tlaku v systému

U takové sestavy je nutné, aby čerpadlo dokázalo zajistit široký rozsah průtoků. Nevýhodou uskupení je pohyb pracovního bodu v oblasti nízké účinnosti, nebo velké rozdíly tlaků v jednotlivých úrovních. [6]



Obr. 13 Charakteristiky potrubního systému v závislosti na výšce hladiny v nádobě[7]

### 3.6. Kombinace čerpadel

Ve vodovodních systémech jsou velmi časté aplikace, kde jedno čerpadlo nestačí. Jde o případy, kdy je potřeba dopravit větší množství kapaliny nebo je potřebný vyšší tlak. Tyto kombinace jsou velmi časté v případech zajištění dodávky vody v rozsáhlých objektech, kde by jedno čerpadlo nezajistilo požadovanou kvalitu dodávky nebo by muselo být dostatečně velké. Jak už bylo uvedeno, účinnost čerpadel je závislá na průtoku. Tedy pokud by veškerá dodávka vody byla zajištěna jedním čerpadlem, byl by tento provoz značně nevhodný.

Tak jako v elektrických obvodech se vyskytují sériově a paralelně řazené zdroje napětí, tak i ve vodovodních systémech jsou paralelní a sériově řazená čerpadla. Čerpadla lze vyjádřit analogicky jako zdroje napětí. Při paralelní kombinaci napěťových zdrojů je možné dosáhnout větších hodnot elektrického proudu. U čerpadel při paralelní kombinaci je zvýšen maximální možný průtok.

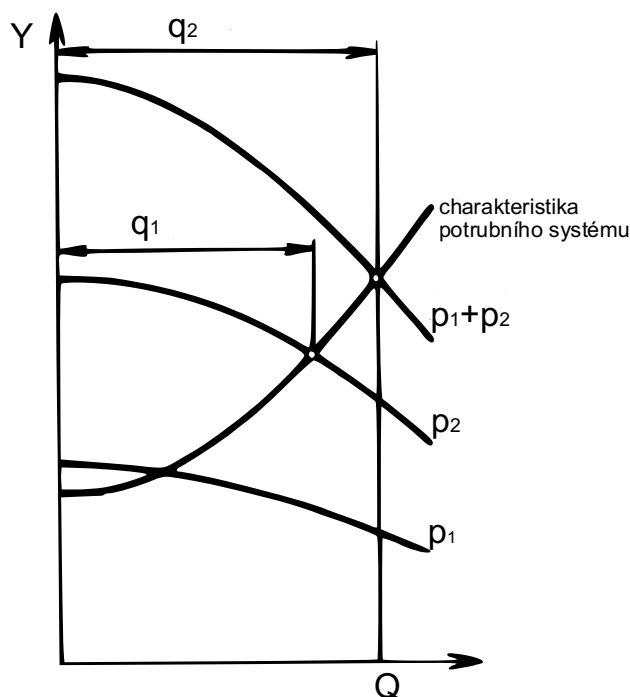
Při sériovém řazení zdroje napětí se výsledné napětí rovná součtinu napětí zdrojů v sérii. U čerpadel v sériové kombinaci roste dosažitelný tlak.

### 3.6.1. Sériová kombinace čerpadel

Sériovém řazení čerpadel se dosahuje vyšších měrných energií. Výsledná měrná energie je dána součtem měrných energií jednotlivých čerpadel. [8] Tento způsob řazení čerpadel se používá pro dosažení vysokých tlaků v potrubním systému nebo pro dopravu tekutiny do vyšší geodetické výšky. Sériové řazení čerpadel se dělí na dva typy. Prvním je sériové řazení čerpadel ve stejné geodetické výšce a druhým typem je případ, kdy čerpadla jsou v různých výškách.

#### 3.6.1.1. Sériově řazená čerpadla ve stejné geodetické výšce

Tento případ zahrnuje právě dvě čerpadla ve stejné výšce se zanedbatelným hydraulickým odporem v potrubí mezi nimi. Výsledná charakteristika čerpadel je dána součtem měrných energií čerpadel, jak je zobrazeno na obrázku 14. [8]

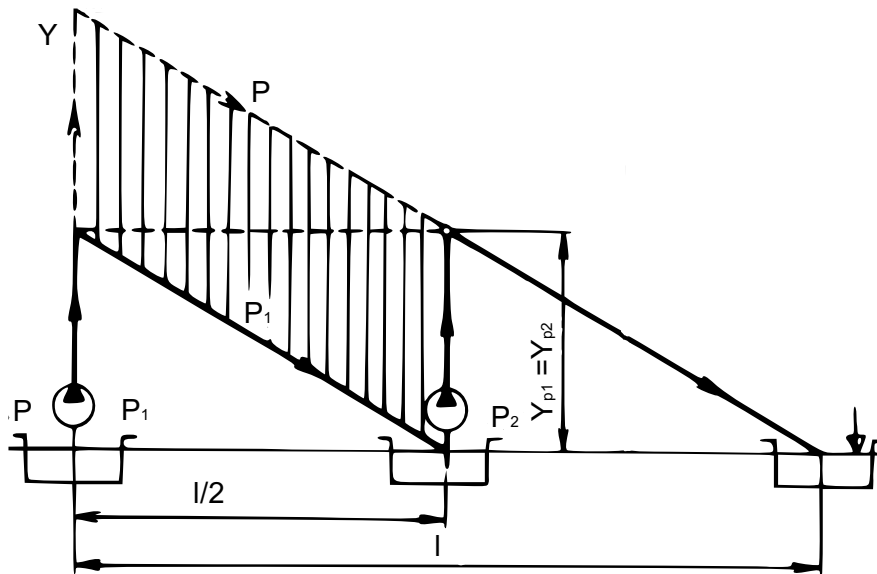


Obr. 14 Pracovní charakteristika sériového spojení stejných čerpadel [6]

Při strmé charakteristice potrubního systému jsou sériově řazená čerpadla schopna zvýšit průtok, jako je zobrazeno na obrázku 14. Další využití tohoto řazení čerpadel ve stejné geodetické výšce může být z důvodu rozdělení měrné energie, kdy není možné použití vícestupňových čerpadel. [8] Při sériovém řazení dvou identických čerpadel je nutné hlídat hladiny tlaku. Čerpadlo, které je v systému zařazeno jako druhé, má při zanedbání ztrát vstupní tlak stejný jako výstupní tlak prvního čerpadla. Pokud jsou tedy použita dvě stejná čerpadla v sérii, nejsou jejich hladiny tlaku identické. Je nutné počítat s touto vlastností a zvolit vhodné těsnění.

### 3.6.1.2. Sériově řazená čerpadla v různé geodetické výšce

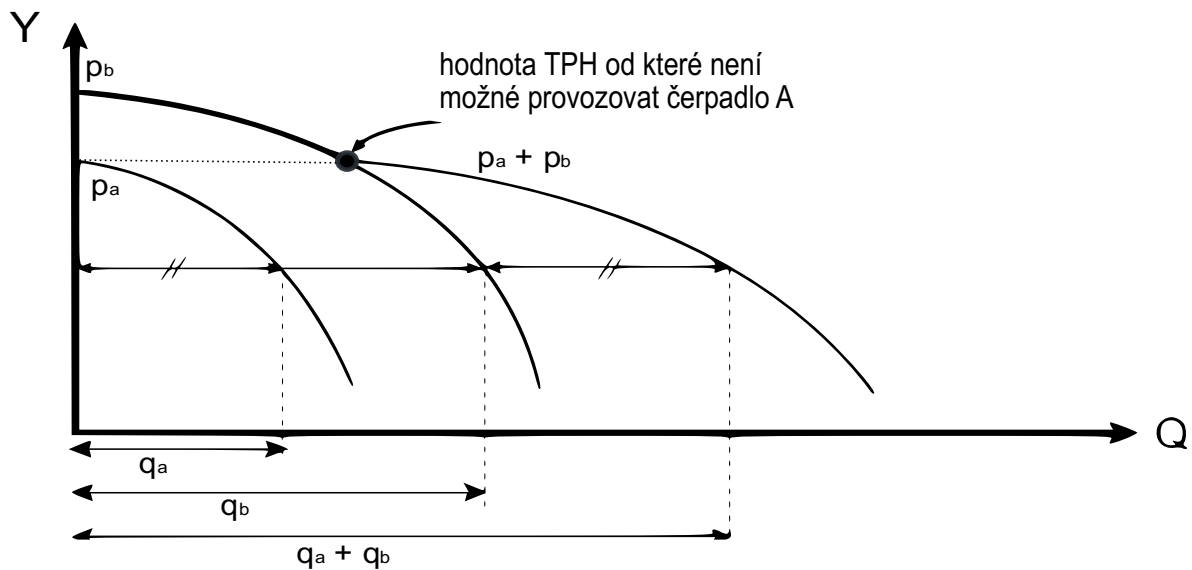
V tomto případě není možné hydraulický odpor mezi čerpadly zanedbat. Čerpadla jsou rozmístěna po čerpací trase v přečerpávajících stanicích. Následkem rozdělení čerpací trasy dochází ke zmenšení hydraulického odporu. Při rozdělení čerpadel je možné použít menší čerpadla. Celková energie potřebná k dopravě tekutin potrubím je menší při použití více menších čerpadel než při použití jednoho většího. Porovnání množství potřebné energie je uveden na obrázku 15.



Obr. 15 rozdělení energií při použití dvou, resp. jednoho čerpadla pro dopravu tekutiny [6]

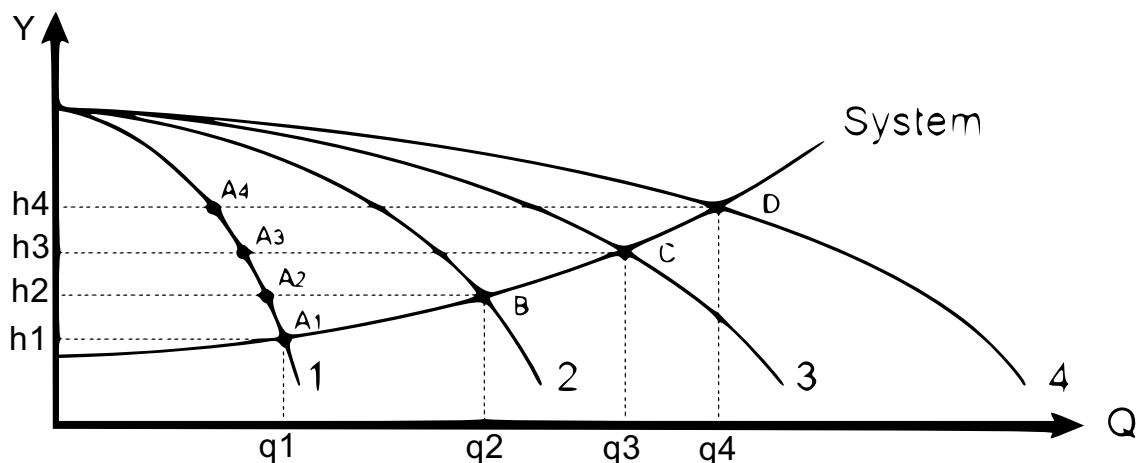
### 3.6.2. Paralelní kombinace čerpadel

Paralelním spojením čerpadel může být dosaženo vyššího průtoku. Důvodem pro paralelní řazení čerpadel může být například nutnost stupňové regulace nebo omezená velikost hnacího pohonu. Výsledný průtok je dán součtem průtoků jednotlivých čerpadel. Při paralelním řazení čerpadel je nutné, aby v nulovém průtoku byla měrná energie nejslabšího čerpadla větší než ztráty potrubního systému. [8] Obrázek č. 16 ukazuje pracovní charakteristiku paralelní kombinace čerpadel, které mají odlišné parametry. Čerpadlo A je možné provozovat až od vyznačeného bodu z důvodu překročení maximální měrné energie. [6]



Obr. 16 Pracovní charakteristika paralelního spojení odlišných čerpadel [7]

Častěji se kombinují čerpadla s podobnými charakteristikami. Tato čerpadla nemusí být z pravidla identická. Mohou mít rozdílné nominální průtoky. [6] Je nutné si uvědomit, že pokud jsou v provozu dvě a více čerpadel, které pracují na úrovních měrných energií  $h_2$ , resp. 3 nebo  $h_4$ , vyznačených na obrázku 17, jejich pracovní bod odpovídá úrovním A2, A3 resp. A4. [6] Z obrázku 17 je zřejmé, že objemový průtok neroste lineárně s přidávanými čerpadly z důvodů ztrát v potrubním systému. Tudiž průtok  $q_4$  je vždy menší než průtok  $4 \cdot q_1$ . [6]



Obr. 17 Pracovní charakteristika paralelního spojení stejných čerpadel [7]

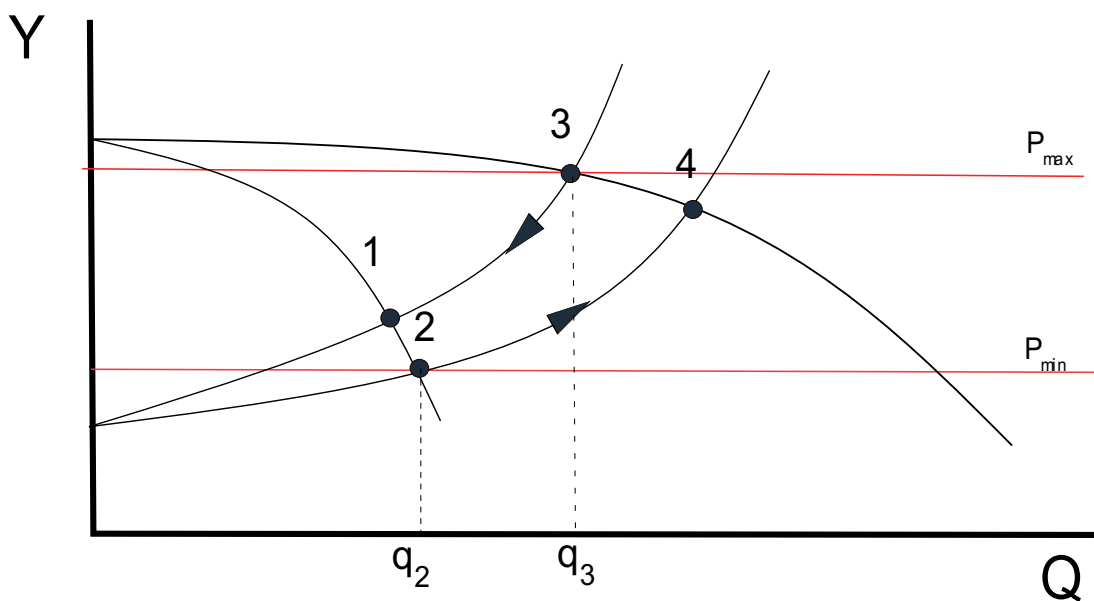
### 3.7. Tlakové řízení čerpadel

Pokud jsou požadavky na dodávané množství v širokém rozsahu, je velmi nepravděpodobné, že by jedno čerpadlo zvládlo pokrýt všechny rozsahy dodávek s dostatečnou úrovní tlaku v



systému. V momentě, kdy jedno pracující čerpadlo není schopno dosáhnout požadovaného tlaku, je zapnuto druhé čerpadlo. Naopak pokud budou v provozu dvě čerpadla a spotřeba se sníží, a požadovaný tlak překročí horní hranici. Druhé čerpadlo se vypne a vodovodní systém bude pracovat pouze s jedním čerpadlem. [6]

Při změně požadovaného průtoku, které nevyžaduje sepnutí dalšího čerpadla, se pracovní body přesouvají po charakteristice čerpadel, tedy například z pracovního bodu 1 na bod 2 na obrázku 18. Při změně pracovního bodu vlivem sepnutí čerpadel se pracovní bod přesouvá po charakteristice potrubního systému například z bodu 2 na bod 4. [6]



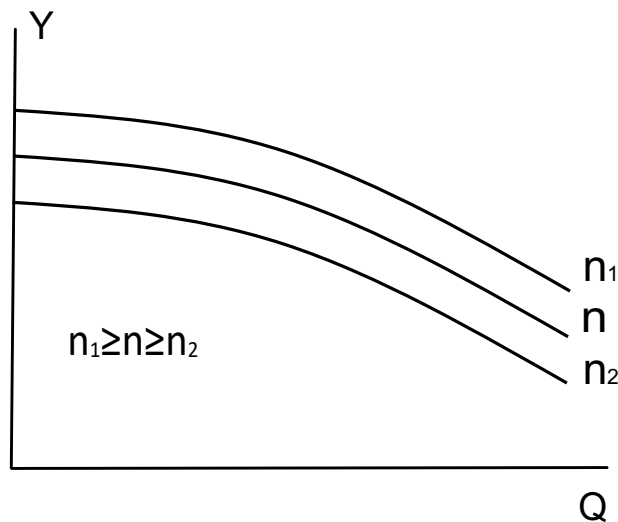
Obr. 18 Pracovní charakteristika paralelního spojení stejných čerpadel

Tento způsob řízení přináší řadu nevýhod. Pokud je potřebný průtok menší než v bodě 1, je zapotřebí přerušovaný provoz jednoho čerpadla, který není žádoucí u radiálních čerpadel. Dalším problémem nastává, když potřebného stavu není možné dosáhnout při trvalém chodu jednoho nebo více čerpadel. Tento případ nastává v případě, kdy je požadovaný průtok mezi body 2 a 3. Provoz s přerušovaným chodem čerpadla je navíc velmi nestabilní, proto se do systému přidává tlaková nádoba. Při změně počtu pracujících čerpadel nastávají hydraulické rázy, které ve vodovodním systému nejsou žádané. Hydraulické rázy způsobují vibrace potrubí, které mohou způsobit poruchu na vodovodním potrubí.

Ke zmírnění vodovodních rázů se používá otáčková regulace, která velké tlakové změny omezuje tím, že změna tlaku v potrubí se mění pomaleji. Otáčková regulace dále napomáhá ke snížení počtu sepnutí motoru, které nebudou tolik namáhány.

### 3.8. Otáčkové řízení čerpadel

Dosud bylo popisováno čerpadlo pouze s jednou charakteristikou. Tato charakteristika se mění v závislosti na rychlosti otáčení čerpadla. Na následujícím obrázku je zobrazena změna charakteristiky v závislosti na rychlosti otáčení.



Obr. 19 Charakteristika čerpadla při různých otáčkách

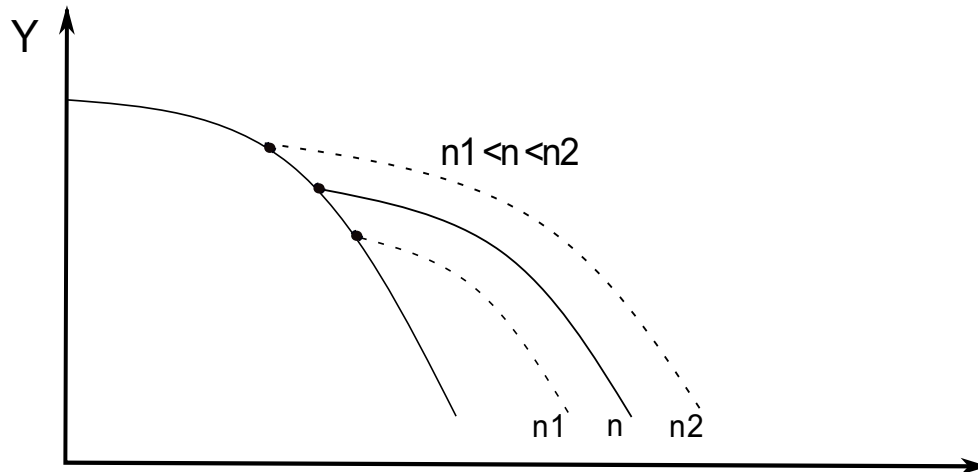
Využití regulace otáček umožňuje dosažení požadovaného tlaku v potrubním systému. V případě, kdy tlak poklesne nebo naopak vzroste, pohon čerpadla svojí vnitřní logikou přikáže čerpadlu zrychlit, resp. zpomalit. Dalšími výhodami otáčkové regulace jsou:

- Omezení ztrát v potrubí.
- Omezení vibrací a hluku vlivem spínání čerpadel.
- Snížení rizika hydraulických rázů a kavitace – tyto jevy nastávají při rychlých změnách otáček.
- Použití jednoho motoru s otáčkovou regulací na místo dvou motorů s odlišnými hodnotami otáček.
- Zvýšená životnost oběžného kola čerpadla.
- Možnost práce čerpadla v místě s nejvyšší účinností – chod čerpadla mimo tento běh omezuje životnost ložiska a těsnění. [7]

Během řízení otáček čerpadla je důležité vědět, že nelze snižovat otáčky až do nulové hodnoty. Pro bezpečný chod čerpadla je důležité udržovat otáčky nad určitou hranicí, tak aby byl zajištěn dostatečný průtok kapaliny přes čerpadlo. Důvodem tohoto omezení je zahřívání čerpadla, které je během chodu ochlazováno pracovní kapalinou. Dalším omezením je maximální možný průtok. Jelikož při velkém průtoku klesá tlak mezi vstupním a výstupním bodem čerpadla, je možné, že se tlak dostane pod kritickou hranici, kdy nastává kavitace. Změna otáček čerpadla není svázána pouze

s charakteristikou měrné energie. Při změně otáček z jmenovité hodnoty  $N_n$  na otáčky  $N$ . Jsou ostatní parametry čerpadla změněny následovně:

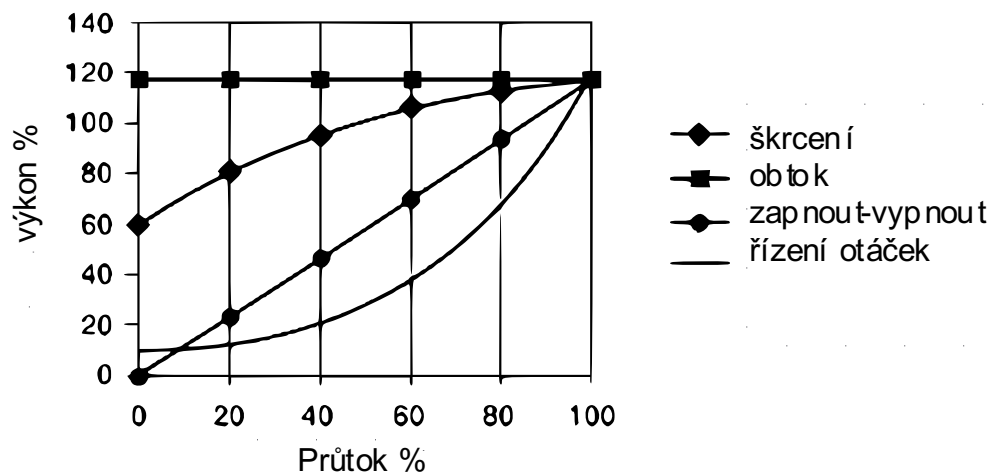
- Změna průtoku  $Q$  je úměrný k  $(N/N_n)$ .
- Změna měrné energie  $Y$  je úměrná k  $(N/N_n)^2$ .
- Změna výkonu čerpadla  $P$  je úměrná k  $(N/N_n)^3$ . [7]



Obr. 20 Ukázka charakteristiky paralelní kombinace čerpadel s různými otáčkami řízeného čerpadla

### 3.9. Řízení průtoku čerpadlem s konstantními otáčkami

Některé aplikace, které nevyužívají otáčkového řízení čerpadel, vyžadují proměnlivý průtok. Využívají se hlavně dva způsoby – škrcením a obtokem. Obě tyto metody řízení jsou ekonomicky nevýhodné oproti řízení otáček čerpadel frekvenčním měničem. V aplikacích s tlakovou nádobou lze použít i způsob řízení, kdy je čerpadlo buď zapnuté nebo vypnuté. Na obrázku níže jsou zobrazeny průběhy výkonů jednotlivých typů řízení. Je vidět, že otáčková regulace je energeticky nejúspornější.

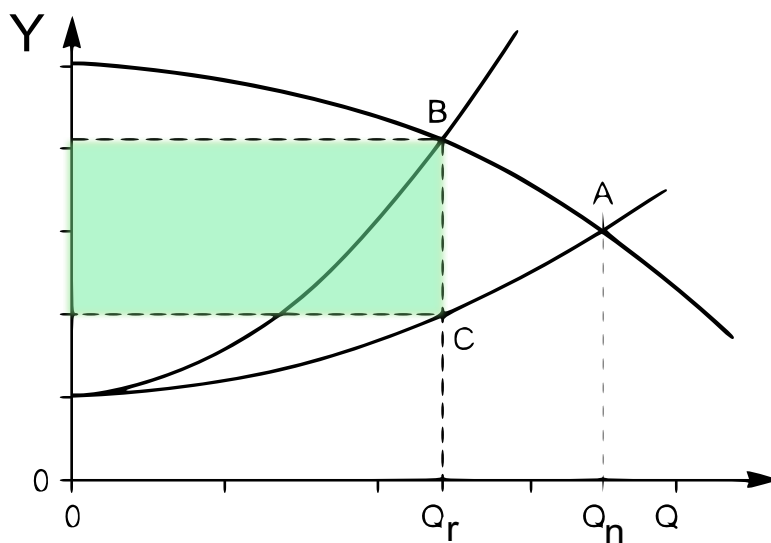


Obr. 21 porovnání typů průběhů výkonu v závislosti na průtoku [15]

### 3.9.1. Regulace průtoku škrcením

Podstatou tohoto způsobu regulace je zmenšení efektivního průřezu vodovodního potrubí. Zmenšení efektivního průřezu potrubí způsobí nárůst tlaku a ztrátu energie kapaliny. [7] Tento způsob regulace je velmi jednoduchý a snadno realizovatelný. Nevýhodou jsou velké ztráty energie, jelikož v každé úrovni průtok čerpadlo dodává kapalině stejný výkon.

Na obrázku 22 je znázorněn nový pracovní bod vlivem škrcení potrubního systému. Pracovní bod je nyní na pracovní charakteristice čerpadla a požadovaném průtoku  $Q_r$ . Ideální pracovní bod by byl bod C. Vlivem škrcení je pracovním bodem bod B a rozdíl úrovní energií udává ztráty. [7]

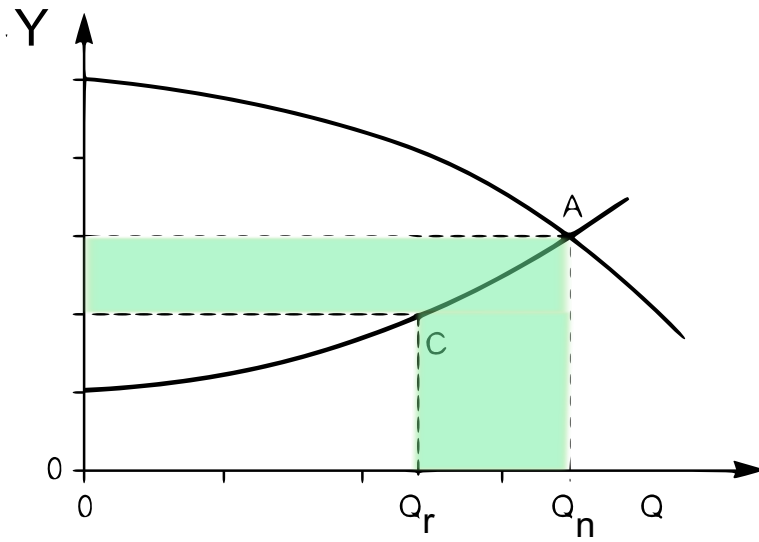


Obr. 22 charakteristika u regulace škrcením [7]

### 3.9.2. Regulace průtoku obtokem

Princip této metody spočívá ve vrácení odčerpané kapaliny zpět do čerpací nádrže regulačním ventilem před čerpadlo. Tato regulace umožňuje přesné dávkování průtoku, ale její nevýhodou je nízká energetická účinnost. Účinnost toho způsobu je větší než u regulace škrcením. [7]

Na obrázku 23 v bodě C je vidět, kde by ležel pracovní bod při regulaci otáček čerpadla. Při regulaci obtokem leží pracovní bod v bodě A. Tedy regulace obtokem nemění pracovní bod při změně požadovaného průtoku. Zvýrazněná část vyznačuje ztracený výkon při regulaci obtokem.



Obr. 23 karakteristika u regulacije obtokem [7]

#### 4. Frekvenční Měnič Altivar 630

Frekvenční měniče Altivar od firmy Schneider Electric mají širokou škálu využití. Hlavní oblasti využití frekvenčního měniče Altivar jsou:

- Vodní hospodářství.
- Zpracování ropy a zemního plynu.
- Těžební průmysl a hutnictví.
- Potravinářský průmysl. [9]

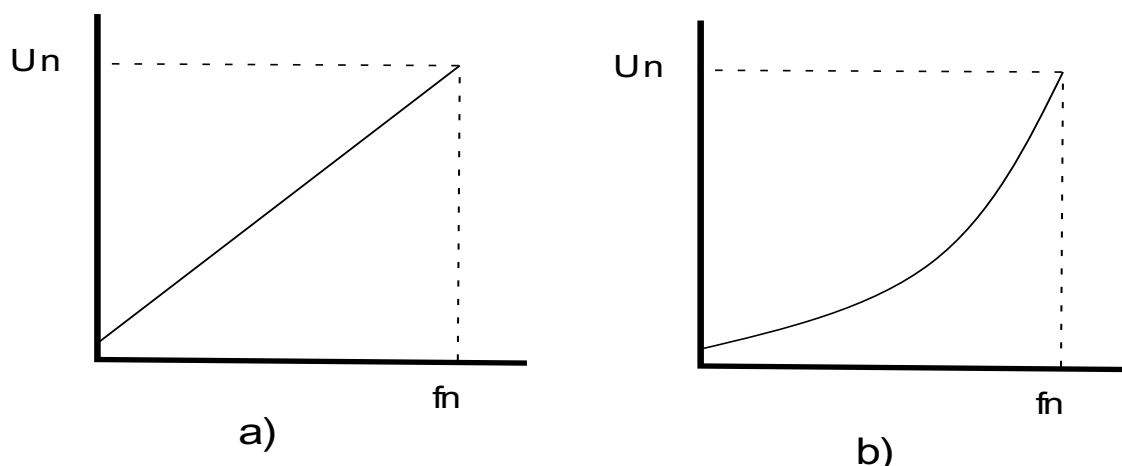
Nejběžnější použití frekvenčních měničů bývá pro řízení asynchronních motorů. Pro řízení asynchronních motorů je používáno řízení změnou napájecí frekvence pomocí spínání tranzistorů IGBT. Při tomto řízení bývá udržován konstantní poměr mezi napájecím napětím a frekvencí, tedy,

$$\frac{U_1}{f_1} = konst. \quad (6)$$

Charakteristika U-f je zobrazena na obrázku 24. V nastavení je možné zvolit stupně frekvencí po kterých se bude charakteristika U-f pohybovat. To znamená, že napětí a frekvence se nebudou měnit postupně, ale skokově podle definovaných úrovní. Důvodem tohoto nastavení může být kritická frekvence systému, kde budou nastávat rezonance. Měniče lze využít na asynchronní stroje s různými charakteristikami momentů. Zejména charakteristiky čerpadel a ventilátorů nemají konstantní závislost momentu na otáčkách. Jejich charakteristiky mají tvar kvadratické funkce, který může být i u poměru vstupního napětí a frekvence. Kvadratická závislost napětí na frekvenci se využívá v případech, kdy ze začátku není potřeba velký moment. Měnič je schopen řídit i jiné typy střídavých motorů. Nicméně Altivar 630 není nastaven pro řízení motorů s buzením, proto lze řídit synchronní motory s permanentními magnety nebo reluktanční synchronní motory. Měnič Altivar 630 má výstupní frekvenční škálu od 0 Hz až do 500 Hz. [10]

Mezi pokročilé funkce měniče Altivar 630 patří:

- Měření spotřeby energie.
- Komunikace přes Ethernet pro přímou kontrolu nastavení.
- Schopnost optimalizace pracovního bodu podle charakteristiky čerpadla.
- Odhad průtoku bez senzorů.
- Omezení přepětí na vstupu motoru.
- Uložení naměřených hodnot a měření „real-time“. [10]



Obr. 24 a)  $U$ - $f$  charakteristika s konstantním poměrem napětí a frekvence b) kvadratická  $U$ - $f$  charakteristika

Altivar 630 obsahuje možnosti řízení pomocí programovatelných vstupů. Na měniči je pět integrovaných analogových vstupů. Tři jsou pro libovolnou konfiguraci a další dva obsahují sondy PTC, PT100. Dále měnič obsahuje šest digitálních vstupů s rozsahem na 24 V, dva analogové výstupy, tři výstupy pro řízení pomocí relé a dva bezpečnostní vstupy. Komunikace měniče je zajištěna přes protokol Modbus, ale je možné přidat moduly na jiné komunikační protokoly. Měnič lze nastavovat více způsoby. Způsob nastavování je libovolný a uživatel si může zvolit podle svých preferencí. Přes všechna nastavení lze dosáhnout stejných výsledků (s výjimkou zapnutí motorů). Měnič Altivar 630 lze ovládat přes počítač pomocí programu SoMove, terminál umístěný na měniči, nebo přes tzv. Web Server. [9] Měnič Altivar nabízí funkce přizpůsobené přímo pro řízení čerpadel. Tato nastavení, jak bylo uvedeno, lze nastavit jak přes terminál na měniči, nebo přes aplikaci SoMove. Pro pokročilejší nastavení řízení čerpadel je pohodlnější použít program SoMove.

Funkce měniče Altivar 630 pro řízení čerpadel jsou:

- Booster Control.
- PID controller.
- Sleep/Wake UP.
- Feedback monitoring.
- Pump characteristics.
- Sensorless flow estimation.
- Head correction.



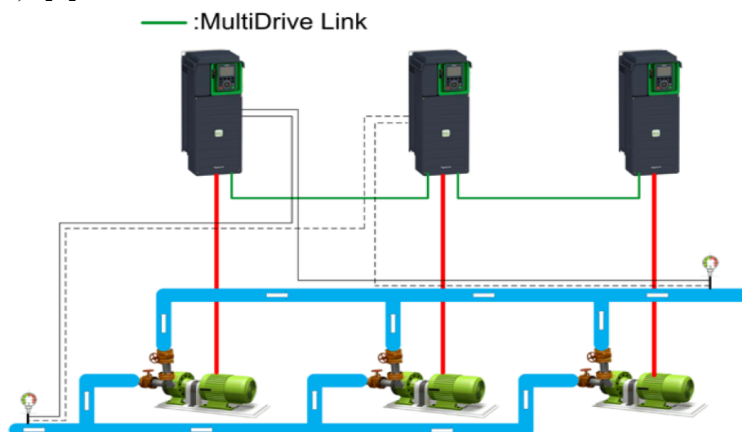
Obr. 25 Měnič Altivar 630 Zdroj: Schneider Electric

#### 4.1. Koncept zapojení měničů a čerpadel

System řízení více čerpadel může být ovládán pouze jedním měničem nebo se používají zapojení jednoho měniče k jednomu čerpadlu. Využití konceptu s jedním nebo více řízeným čerpadlem samozřejmě záleží na určité aplikaci. Implementace řízení více čerpadel je ekonomicky náročnější, jelikož obsahuje více měničů.

##### 4.1.1. Zapojení s více měniči

Tento koncept se využívá pro náročnější aplikace. Měniče zajišťují kompletní řízení všech zapojených čerpadel. Měniče jsou v tomto konceptu propojeny. Měniče mohou sloužit jako tzv. „Master“ nebo „Slave“ pokud jsou propojeny přes technologii „Multi-Drive Link“. V tomto zapojení jsou senzory zapojeny do hlavního měniče (Master) nebo do druhotného hlavního měniče (Secondary Master). [9]

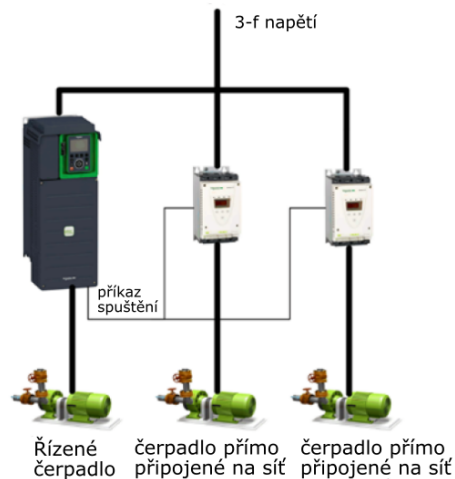


Obr. 26 řízení čerpadel s více měniči zdroj: Schneider Electric



### 4.1.2. Zapojení s jedním měničem

Tento koncept se používá pro jednodušší systémy. Měnič zajišťuje řízení pouze jednoho motoru. Dále měnič zajišťuje spínání ostatních čerpadel. Měnič Altivar 630 je schopen řídit až 5 čerpadel s přímým zapojením a jedno čerpadlo s nastavitelnými otáčkami. [9]



Obr. 27 Zapojení řízení čerpadel s jedním měničem Zdroj: Schneider Electric

### 4.2. Ovládání přes Web Server

Pro tento typ ovládání uživatel nemusí mít nainstalovanou žádnou konkrétní aplikaci k řízení pohonu a ani nemusí být v blízkosti měniče. Operátor se může připojit k datům nastavení z jakéhokoliv místa, pokud má přístup k internetu. Stačí, aby byl měnič připojen k síti přes ethernetovou síť. Po připojení měniče k síti stačí zadat IP adresu měniče a internetová aplikace se spustí. [10]

Při ovládání přes Web Server operátor nemusí být na místě, kde je pohon umístěn. Protože operátor nevidí situaci v okolí, jsou ovládací funkce přes Web Server omezené. Operátor například nemůže spustit nebo vypnout pohon. Tyto operace by byly bez přehledu pohybu osob v okolí pohonu velmi nebezpečné. Web Server se proto používá hlavně pro vzdálenou kontrolu nastavení měniče, sledování spotřeby energie, získávání dat o provozu motoru a pro diagnostiku. [10]

### 4.3. Ovládání přes terminál

Tento způsob nastavení je možný implementovat až při připojení měniče na zdroj napětí. Ovládání na terminálu je výhodné z pohledu, že uživatel nemusí mít s sebou žádné vybavení a dokáže nastavit parametry měniče. Velkou nevýhodou tohoto nastavení je nepřehlednost rozhraní. Display a ovládací tlačítka terminálu jsou velmi malá a nenabízí velký komfort při ovládání.



Obr. 28 Ukázka zadávání štítkových hodnot motoru

#### 4.4. Ovládání přes program SoMove

SoMove je ovládací program, který dokáže komunikovat s měniči od firmy Schneider Electric. V tomto softwaru lze nastavit všechny parametry jako při práci s terminálem na měniči. Nicméně nastavování je mnohem uživatelsky pohodlnější, a navíc při nastavování parametrů v programu SoMove jsou k dispozici informace, které pomáhají uživateli lépe pochopit určité funkce nebo parametry měniče. Při práci v programu SoMove jsou dobře viditelné i zkratky jednotlivých parametrů měniče, ty jsou zobrazeny na obrázku níže. Například jmenovitý výkon motoru má zkratku „NPR“. Tyto zkratky slouží dále pro jednodušší nastavení komunikace mezi jednotlivými zařízeními od firmy Schneider Electric. Každému parametru je přiřazena unikátní adresa, která po zavolání navrátí hodnotu parametru.

NPR : Nominal motor power:

UNS : Nominal motor voltage:

Obr. 29 Názvy parametrů a jejich unikátní zkratky, program SoMove, Schneider Electric

#### 4.4.1. Postup nastavení řízení přes SoMove

V prvním kroku je nutné nastavit štítkové parametry stroje. Na obrázku 30 je znázorněna grafika pro zadávání štítkových hodnot stroje. Na obrázku jsou dále zobrazeny jednotlivé zkratky jednotlivých parametrů. Z obrázku je také patrné, že v této fázi lze spustit také „Autotuning“. Po ukončení funkce „Autotuning“ měnič získá podrobná data o obvodu motoru. Během krátkého časového úseku kolem tří vteřin měnič zná parametry jako je:

- Odpor statorového vinutí
- Rozptylovou indukčnost
- Magnetizační proud
- Časovou konstantu rotoru

BFR Basic frequency:  50Hz IEC  60Hz NEMA

IPL : Input Phase Loss assignment:

NPR : Nominal motor power:

UNS : Nominal motor voltage:

NCR : Nominal motor current:

FRS : Nominal motor frequency:

NSP : Nominal motor speed:

ITH : Motor Thermal current:

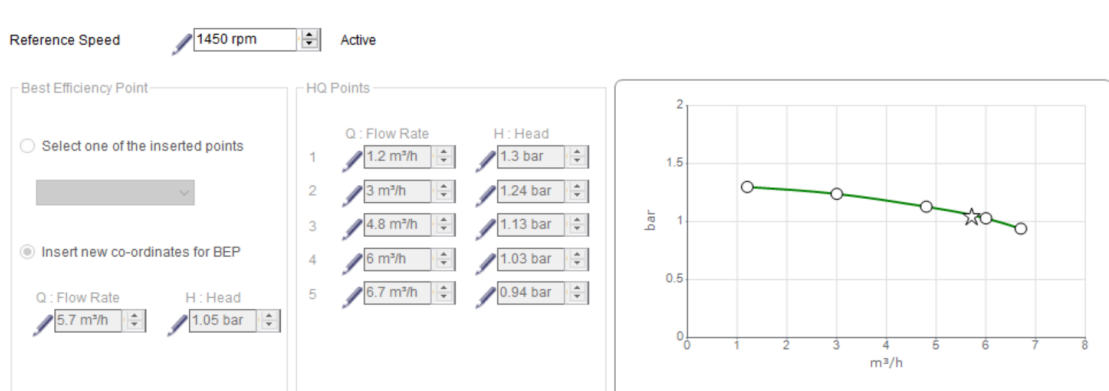
— Autotune —  
Autotune is used to optimize the application performance by fast and adapted adjustments.

TUN Perform Autotune : TUS Autotune status  
Autotuning Done

Obr. 30 Ukázka zadávání štítkových hodnot v programu SoMove od Schneider electric

##### 4.4.1.1. Nastavení parametrů čerpadla

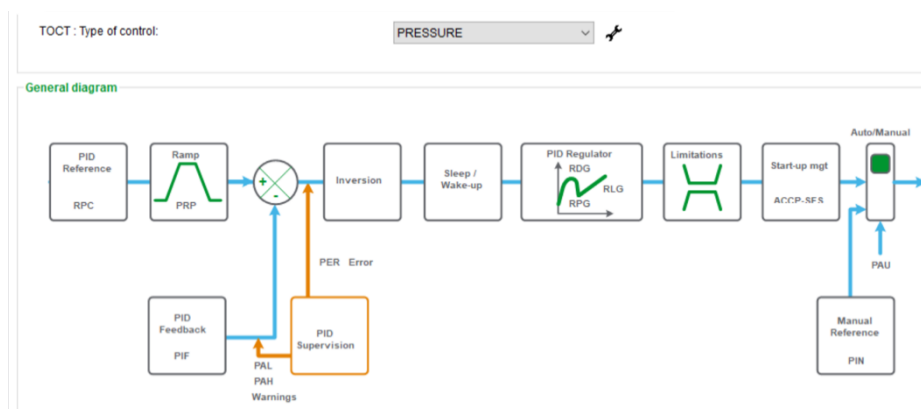
Do programu SoMove lze zadat čerpadlovou charakteristiku se souřadnicemi pro bod s nejvyšší účinností *BEP* (Best Efficiency Point). Program dále dokáže graficky znázornit v jakých místech na charakteristice se nachází.



Obr. 31 zadávání bodů pro vytvoření čerpadlové charakteristiky v programu SoMove od Schneider Electric

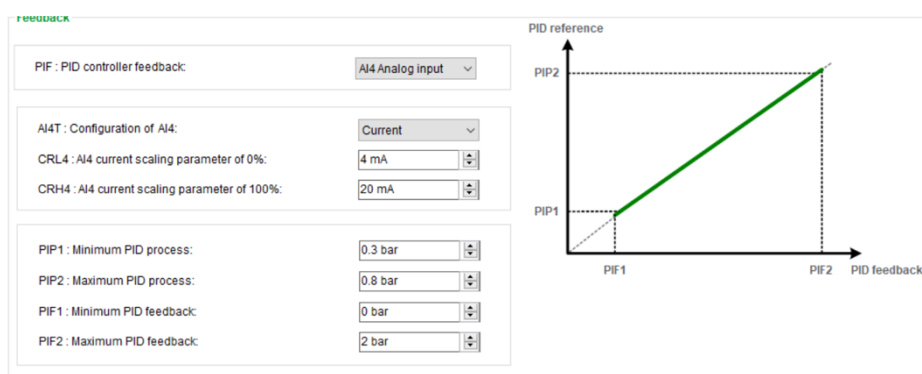
#### 4.4.1.2. Nastavení PID regulátoru

Program SoMove provede uživatele celkovým nastavením PID regulátoru. Jako první je v nabídce PID regulátoru zobrazen diagram regulace, který uživateli vysvětluje proces nastavování regulátoru.



Obr. 32 program SoMove, Schneider Electric, Diagram Regulace

V následujícím kroku se nastavují vlastnosti referenční a výstupní hodnoty. Je nutné znát vlastnosti měřícího zařízení a vědět rozsah výstupní veličiny, který odpovídá naměřené hodnotě. Dále je možné nastavit koeficienty regulátoru. Program SoMove pomocí tabulky a grafického znázornění přechodové charakteristiky pomáhá uživateli lépe naladit regulační konstanty.



Obr. 33 program SoMove, Schneider Electric, Nastavování vstupní a výstupní veličiny regulátoru

Program SoMove umožňuje nastavení hlášení při překročení určité meze. Varování o překročení určité hranice lze nastavit pro minimální a maximální hodnotu naměřené hodnoty, ale také pro úroveň regulační odchylky.

RPG : PID Proportional gain: 1

RIG : PID controller integral gain: 1

RDG : PID derivative gain: 0

PIS : PID integral disabled: Not assigned

PIC : PID inversion: No

POL : PID controller min. output: 0 Hz

POH : PID controller max. output: 60 Hz

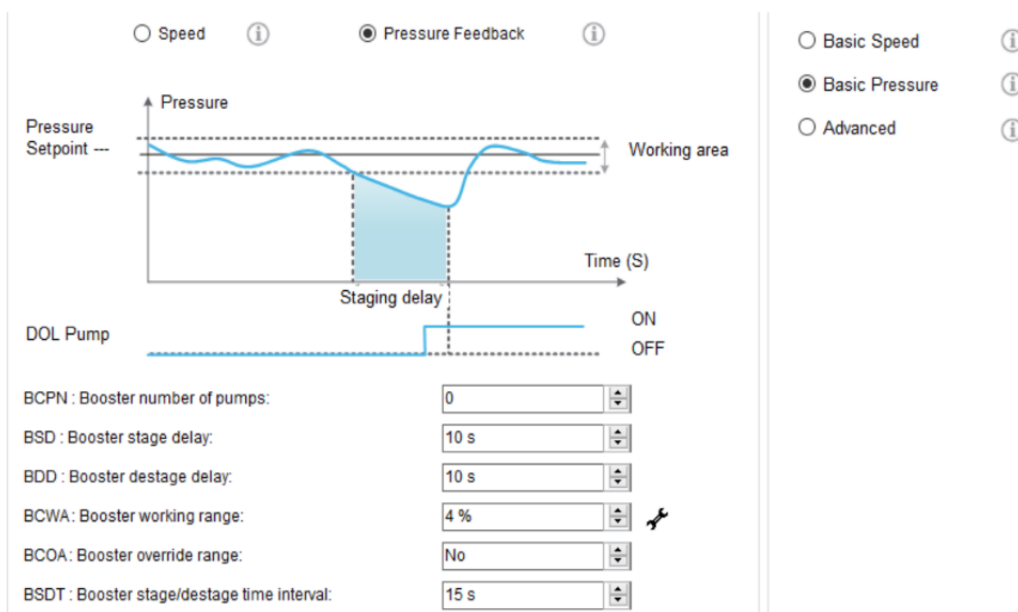
Parameter		Rise time	Overshoot	Stabilization time	Static error
RPG	↗	↘↘	↗	=	↘
PER	↗	↘	↘↘	↗	↗↗
RDG	↗	=	↘	↘	=

Obr. 34 program SoMove, Schneider Electric, Zadávání regulačních koeficientů a tabulka s jejich vlastnostmi na přechodovou charakteristiku

## 4.5. Booster Control

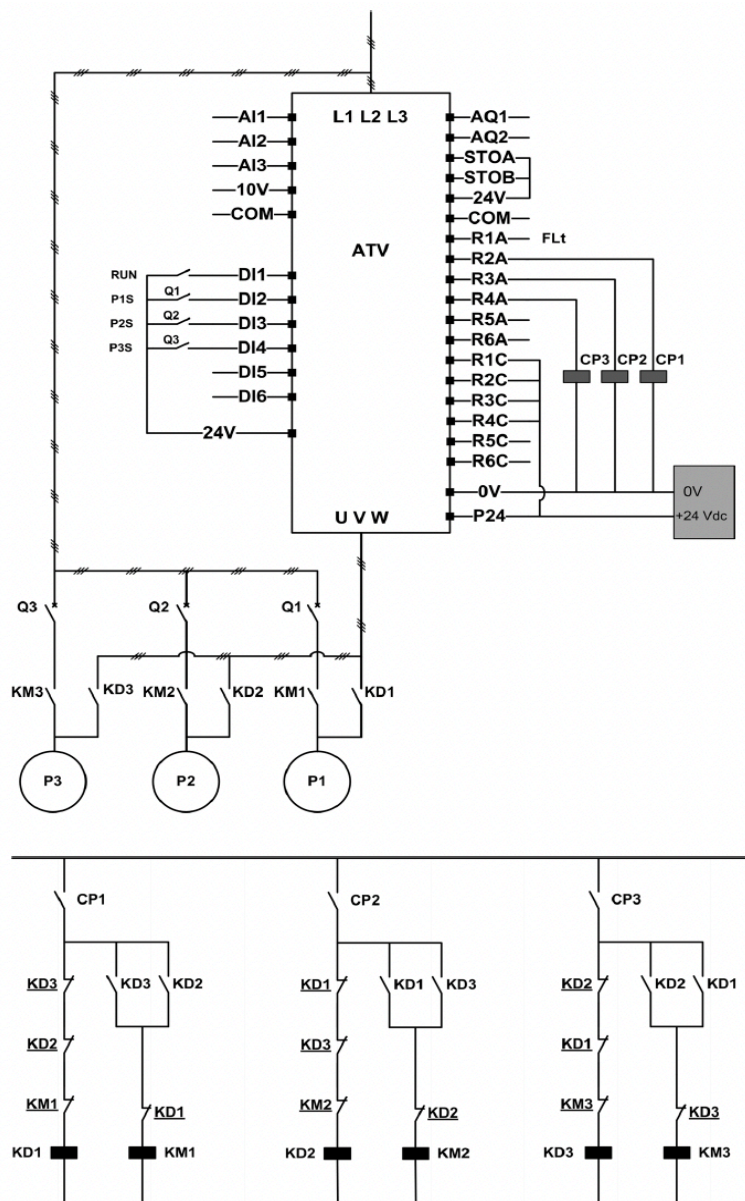
Tato funkce se používá při řízení více čerpadel ve stejném vodovodním systému, kdy je nutná práce více čerpadel zároveň. Všechna čerpadla mohou být řízena svým vlastním měničem, nebo jak bylo uvedeno, je možné řídit otáčky jednoho čerpadla a ostatní čerpadla připojovat přímo na zdroj napájení pomocí řízeného relé. Pro nastavení funkce Booster Control je nutné zadat parametry jako jsou:

- Počet pracujících čerpadel
- Zpoždění zapnutí/vypnutí čerpadla
- Povolená odchylka od požadované hodnoty
- Časový interval od další změny počtu pracujících čerpadel



Obr. 35 program SoMove, Schneider Electric, nastavení Booster Control,

Celkové nastavení této funkce je doprovázeno i grafickým vysvětlením parametrů, které je zobrazeno na obrázku 35. U nastavování těchto parametrů je důležité, aby operátor měl přehled o aplikaci řízení. Nastavení Booster Control ovlivňuje spínání čerpadel, které má vliv na celkovou životnost stroje. Jakmile bude mez přijatelné regulační odchylky příliš malá, nebo frekvence spouštění motoru bude příliš vysoká, životnost motoru se bude zkracovat. Doba mezi jednotlivými zapnutími motorů je také nutná nastavit, tak aby doprava tekutiny byla kontinuální a nedocházelo k výpadkům dodávky na dobu danou prodlevou. nebo naopak aby tekutina nebyla dopravována v momentě, kdy je to nežádoucí. Při paralelně zapojených čerpadlech, funkce Booster Control umožňuje řízení čerpadel v libovolném pořadí v závislosti na době běhu motoru nebo počtu sepnutí. To znamená, že pokud je používáno více čerpadel, měnič sám dokáže rozložit zátěž na více čerpadel. Schéma pro nastavení funkce Booster Control je zobrazeno na obrázku 36.

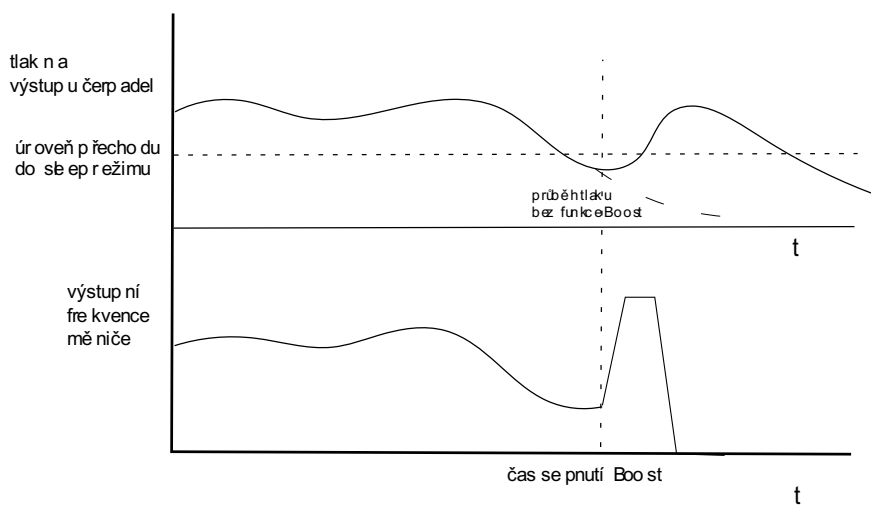


Obr. 36 Schéma s řízením vždy jen jednoho čerpadla a ostatních dvou s přímým zapojením, zdroj: Schneider Electric

## 4.6. Sleep/Wake up

Tato funkce umožňuje vypnout motory, pokud zrovna není potřebná dodávka kapaliny. To šetří energii a snižuje rychlost opotřebení stroje. V závislosti na nastavení parametrů funkce se motor vypíná, když je po delší dobu potřebná dodávka minimální, například noční spotřeba vody v panelovém domě. Pokud se potřeba vody zvýší, čerpadlo se automaticky sepne na požadované otáčky. [11] Pro použití této funkce je nutné použití tlakové nádoby.

Sleep/Wakeup funkce dále obsahuje možnost nastavení tzv. Boost. Funkce Boost před vypnutím, kvůli malému odběru, roztočí čerpadlo na krátkou dobu na jmenovité otáčky a zvýší tlak ve vodovodním systému, který umožní delší pauzu v chodu čerpadla. [11]



Obr. 37 Průběhy tlaku a otáček během spuštění funkce sleep/wake up s funkcí boost

## 4.7. Detekce malého průtoku

Měníč Altivar 630 obsahuje mnoho diagnostických funkcí. Jednou z nich je detekce malého průtoku. Při malých průtocích nastává problém s přehříváním čerpadla, protože médium, kterému čerpadlo dodává energii a zároveň ho i chladí. Malý průtok je detekován buď pomocí externího průtokoměru, nebo pomocí zadaných dat do měniče. [11]

## 5. Komunikační protokol

Měnič Altivar 630 a obrazovka monitorující provozní stavy jsou zařízení, která pracují odděleně. Aby bylo možné zobrazovat informace, které měnič sbírá, je nutné vytvořit komunikační kanál mezi těmito zařízeními. Pro komunikaci je využíván protokol Modbus TCP/IP.

### 5.1. TCP/IP

Tento komunikační protokol zajišťuje, aby odesílaná data přišla v nezměněném tvaru i příjemci zprávy. TCP/IP rozděluje odeslaná data do tzv. „paketů“, které jsou u příjemce spojeny do původní zprávy. Tento způsob umožňuje přijímání zprávy s vysokou přesností, na rozdíl od poslání celé zprávy najednou. TCP a IP jsou rozdílné protokoly, které pracují společně na přenosu dat. IP je protokol, který zjišťuje, na jakou adresu je nutné odeslat dat, zatímco TCP hlídá správnost odeslaných dat na získanou adresu. [12]

#### 5.1.1. Vrstvy TCP/IP protokolu

Komunikační protokol TCP/IP se skládá ze 4 vrstev, které zajišťují přenos dat.

- Vrstva síťového rozhraní – umožňuje komunikaci mezi zařízeními. Tuto vrstvu zajišťují ethernetové kabely, bezdrátová síť, síťové karty, ...
- Síťová vrstva – zajišťuje výměnu informací. Tato vrstva je zodpovědná za skládání paketů v místě určení.
- Transportní vrstva – zajišťuje spolehlivou komunikaci mezi zařízeními
- Aplikační vrstva – tato vrstva je soubor aplikací, který uživatelům umožňuje přístup k síti [12]

### 5.2. Komunikační protokol Modbus

Modbus je velmi rozšířeným komunikačním prostředkem v průmyslu. Jedná se o protokol, který přenáší informace mezi zařízeními (původně probíhal přenos přes sériovou linku, aktuálně je více využívána komunikace přes TCP/IP). Modbus je tzv. master/slave protokol. To znamená, že hlavní jednotka (master) řídí výměnu dat s několika podřazenými jednotkami (slave). Modbus/IP je nejčastěji používán přes ethernetovou síť a přenos dat je přenášen Modbus serverem přes IP adresu. Jednotka Slave nemůže vysílat informace samovolně, tato jednotka čeká až ji vyzve Master. [13] I přes vlastnictví firmy Schneider Electric, je Modbus volně dostupným protokolem.

### 5.3. Modbus RTU

Dříve byl nejvíce rozšířený protokol Modbus RTU, který byl relativně jednoduchý. Tato technologie vysílala jednotlivé byty. Každá síť měla alespoň jednu Master jednotku a jednu nebo více Slave



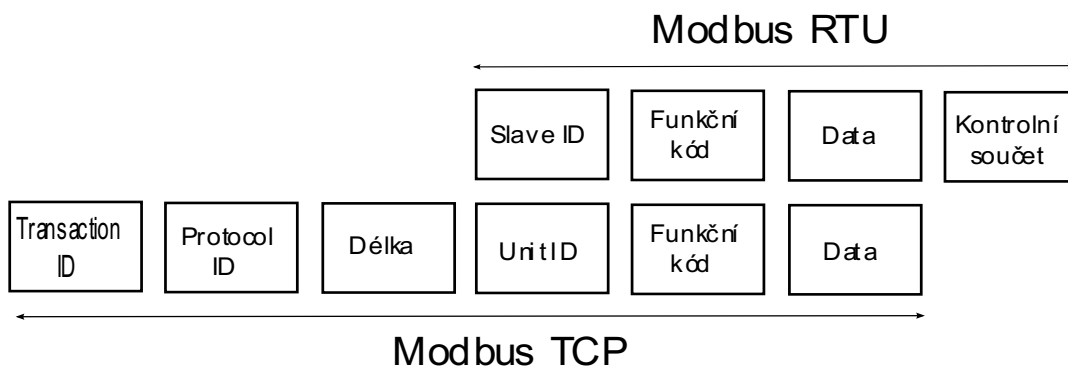
jednotek. Každé Slave jednotce byla přiřazena osmibitová adresa nebo sériové číslo. Slave odpovídá pouze pokud rozpozná svou adresu. [13] Veškerá komunikace se skládá z požadavku od Master jednotky následovaného odpovědí od Slave. Každá zpráva, ať je to požadavek nebo odpověď, se skládá z:

- Adresy zařízení
- Kódu funkce
- Speciálních dat
- Kontrolního součtu [13]

#### 5.4. Modbus TCP/IP

Protokol Modbus TCP obsahuje části protokolu Modbus RTU, ke které přidá speciální hlavičku. Z protokolu Modbus RTU už nadále není využívána adresa zařízení a kontrolní součet, čímž vznikne protokolová datová jednotka PDU. [14] Do protokolu Modbus TCP/IP jsou přidány následující parametry:

- Transaction ID je složeno ze 2 bytů a slouží k identifikaci příkazu. Zařízení Slave po obdržení zprávy posílá odezvu ve formě zopakování Transaction ID.
- Protocol ID – Zařízení Master nastavuje 2 byty, které jsou v protokolu Modbus TCP/IP vždy 00 00.
- Délka – Master vysílá 2 byty obsahující informaci o délce zprávy
- Unit ID – Master vysílá 1 byte, který Slave zopakuje pro identifikaci zařízení [14]



Obr. 38 Schéma zprávy Modbus TCP a Modbus RTU

## 6. Monitorování procesních veličin

Obecně komplexní programy, kde je potřeba zásah nebo kontrola obsluhou, se dělí na dvě základní části. První částí je tzv. „backend“. V této části je zahrnut veškerý chod stroje včetně výpočtů veličin, které uživatel vidí na grafických panelech. Druhou částí je „frontend“. Tato část zajišťuje zobrazování veličin v grafickém rozhraní tzv. GUI (Graphic User Interface). Velkou nevýhodou tohoto rozhraní je výpočtová, resp. časová náročnost procesu vykreslování prvků zobrazovaných na panelech. U velkých strojů bývá „frontend“ zajišťován odděleným zařízením, které získává informace přes komunikační protokol ze zařízení, které zajišťuje řídicí procesy stroje. Pokud je „backend“ a „frontend“ zajišťován jedním procesorem je nutné tyto dva procesy rozdělit do dvou výpočetních vláken tak, aby časová náročnost vykreslování neměla vliv na řízení.

Monitorování provozních veličin a stavů se provádí pro přehledné získávání dat nebo nastavování požadovaných stavů. V praxi velmi často nastávají situace, kdy je stroj řízen obsluhou, která nebyla uvedena do procesu vytváření řídicího programu a nezná detaily obsluhy stroje (tato situace může nastat v případě dodávky kompletního řešení stroje včetně vizualizace externí firmou). Ovládání stroje může být ale i jednoduché, takže pro jeho ovládání stačí základní školení.

Vizualizace procesů se také řídí určitými pravidly. Jedním ze základních pravidel je snadná orientace v grafickém rozhraní. Toto pravidlo se může zdát na první pohled jako velmi jednoduše splnitelné. Při aplikování vizualizace stavů komplexního stroje s mnoha procesními veličinami nastává problém s členěním programu tak, aby se obsluha dokázala rychle a efektivně orientovat v grafickém rozhraní. Jednotlivé grafické panely nebo obrazovky je dobré koncipovat tak, aby měly podobné rozložení informací. Například, aby se chybové hlášky, datum a hlavní informace obrazovky objevovaly na stejném místě všude v programu. Programátor GUI by měl koncipovat orientaci v programu tak, aby přepínání mezi jednotlivými obrazovkami nebo grafickými panely fungovalo vždy stejně na každé obrazovce. To znamená, že například tlačítka pro zobrazování jednotlivých obrazovek budou v programu stále na jedné pozici nebo styl přepínání bude jednotný v celém programu.

Během vizualizace procesů může nastat situace, kdy je potřeba zobrazit jednu veličinu na několika místech v GUI. Pro zvýšení přehlednosti platí pravidlo, které říká, že pokud je v GUI jeden objekt umístěn vícekrát, měl by být zobrazen ve stejném stylu. To znamená, že pokud je například v jedné části programu umístěn sloupcový graf s jedním barevným stylem, je nutné, aby měl stejný sloupcový graf v jiném místě programu stejný barevný styl.

Programátor GUI by měl dbát hlavně na přehlednost rozhraní. Je důležité, aby se obsluha stroje dokázala rychle orientovat v aktuální obrazovce. K dosažení dobré přehlednosti by mělo být na obrazovce dostatečné množství informací. Velké množství zobrazených provozních stavů na jedné obrazovce by mohlo odvádět pozornost od těch skutečně důležitých veličin a mohlo by dojít k chybě

operátora stroje. Přehlednost grafického rozhraní je závislá na barevném kontrastu pozadí a prvků umístěných na panelu. Velmi často se v průmyslových aplikacích používá barva pozadí buď černá nebo šedá. Tyto barvy následně umožňují použití široké škály barev pro grafické prvky jako jsou například tlačítka nebo geometrické tvary.

Návrh grafického rozhraní je téměř vždy jedinečný pro specifickou aplikaci. Návrh rozložení obrazovek bývá navržen dle požadavků zákazníka. Když se například modernizuje stroj nebo se nahrazuje nové zařízení za staré, obsluha je zvyklá na určitý způsob ovládání. Nastávají situace, kdy firma, která získala zakázku, vytvoří ovládací obrazovky na základě původní verze.

Pro zobrazování provozních stavů, které řídí měnič Altivar 630 od firmy Schneider Electric, je jednodušší použít obrazovku od stejného výrobce. Obrazovky od firmy Schneider Electric komunikují velmi snadno s měničem přes protokol Modbus TCP/IP. Programování obrazovky pro HMI (Human-Machine Interface) od firmy Schneider Electric je implementováno v programu Vijeo Designer.

## 7. Program Vijeo Designer

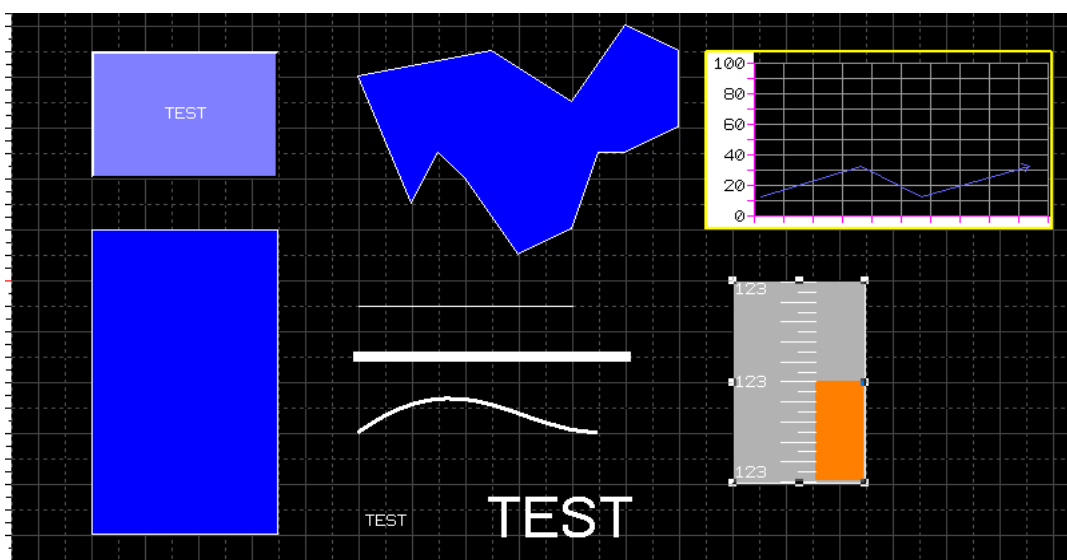
Jak již bylo uvedeno, měnič je možné ovládat přes program SoMove nebo přes terminál umístěný přímo na měniči. Pro některé aplikace není vhodné, aby měla obsluha přístup k úplnému ovládání stroje, nebo je měnič uložen v rozvaděči, kam nemá obsluha stroje přístup. Pro tento případ jsou implementovány informační a ovládací obrazovky. Ovládání stroje se nazývá HMI (Human Machine Interface). Schneider Electric používá pro své aplikace interní obrazovky, které se programují pomocí programu Vijeo Designer.

### 7.1. Funkce programu Vijeo Designer

Tento program umožňuje jednoduché vytváření grafických obrazovek pro ovládání strojů s měniči od firmy Schneider Electric. Jednotlivé obrazovky se mohou skládat buď z textových zpráv pro uživatele, dat měniče nebo zpráv pro obsluhu. Knihovna objektů programu Vijeo Designer obsahuje jak základní grafické prvky, jako jsou tlačítka nebo signalizace stavu logické proměnné, tak i složitější prvky, například grafy.

### 7.2. Grafické panely

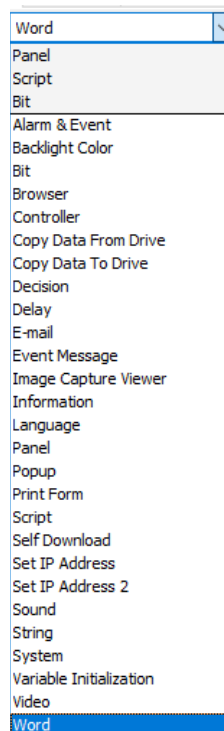
Panely tvoří základ tvorby GUI v programu Vijeo Designer. Panely slouží jako podklad pro ovládací prvky jako jsou tlačítka, grafy, atd... Vijeo Designer obsahuje možnost tvorby obyčejných panelů, nebo je možnost vytvoření tzv. „pop-up“ panelů. „Pop-up“ panely rozšiřují funkce hlavních panelů, ze kterých jsou volány, například informační tabulka nebo klávesnice pro zadávání hodnot parametrů. Prvky se vkládají do panelů pomocí nabídky v programu Vijeo Designer. Po vybrání typu prvku uživatel nastaví polohu a velikost. Další vlastnosti prvku se nastavují v nabídce „properties“.



Obr. 39 Ukázka grafických prvků v programu Vijeo Designer od Schneider Electric

### 7.3. Funkční prvky


Pro umístění funkčního prvku, jako je například tlačítko, do panelu je potřeba zvolit prvek v nabídce na horní liště v programu. Tlačítko v programu Vijeo Designer je označeno jako „switch“. Prvek se umísťuje na libovolné místo na panelu a nastaví se jeho rozměry, barva a nadpis. Tlačítko v programu Vijeo Designer má mnoho funkcí, jako je například změna stavu logické proměnné nebo spuštění skriptu obsahující funkce zadané uživatelem. Na obrázku níže jsou zobrazené funkce tlačítka. Základními funkcemi jsou „Panel“ a „Bit“. Funkce „Panel“ přepíná obrazovky v projektu. Funkce „Bit“ přepíná stavy zvolené logické proměnné.



Obr. 40 Seznam funkcí tlačítka v programu Vijeo Designer, Schneider Electric

### 7.4. Proměnné v programu Vijeo Designer

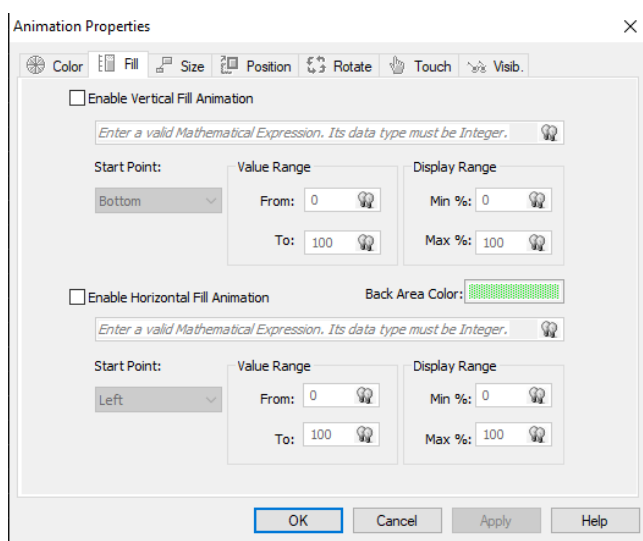
Jak bylo uvedeno, některé objekty jsou závislé na hodnotách proměnných. Program Vijeo Designer rozlišuje dva typy proměnných. Prvním typem jsou proměnné vnitřní (Internal). Tento typ proměnné neobsahuje data z měniče a je viditelný v celém projektu a lze ho použít v jakémkoliv panelu nebo akci. Druhým typem jsou proměnné vnější (External). Tento typ proměnné nabývá hodnotu podle specifické adresy proměnné měniče. Adresa, která je přidělena určité veličině, je dána volně přístupnou tabulkou firmy Schneider Electric. Adresu, která je přidělena určité veličině v měniči, lze najít v dokumentu „ATV600 – Communication parameters address“ na internetových stránkách firmy Schneider Electric.

 flow	UINT	Internal			Disabled	None
 freq_in_drive_motor	INT	External	Drive1	%MW3202	Disabled	LoggingGroup01

Obr. 41 Příklad vytvoření vnitřní a vnější proměnné, program Vijeo Designer, Schneider Electric

## 7.5. Možnosti práce s objektem v programu Vijeo Designer

Obrazovky ve Vijeo Designeru mohou dále obsahovat grafické objekty jako například kruh, úsečka nebo obdélník. Vijeo Designer nabízí mnoho funkcí, jak lze tyto objekty využít pro různé aplikace. Objekty lze navázat na proměnné typu například INT nebo BOOL. Po navázání se mohou objekty různě natáčet, měnit barvu, pozici, velikost, .... Tyto funkce mohou být užitečné při zobrazení složitějších tvarů, nebo zobrazení elektrického zapojení se spínači.



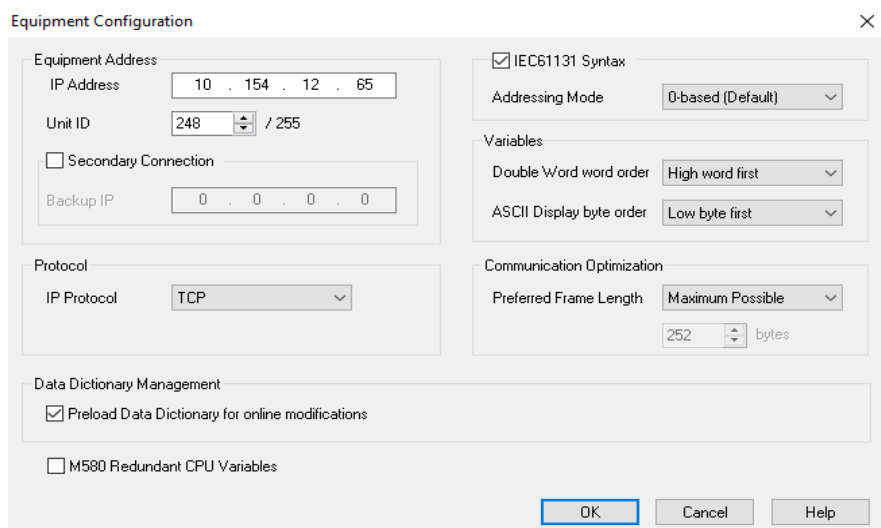
Obr. 42 nabídka funkcí objektu, Vijeo Designer, Schneider Electric

## 7.6. Práce programu na pozadí

Vijeo Designer umožňuje vytvoření tzv. „akcí“. Tyto akce jsou libovolné programovatelné funkce jako u nabídky funkcí tlačítek. Výhodou těchto funkcí je jejich stálá aktualizace po určitých časových intervalech, i když se uživatel zrovna nenachází na aktuálním panelu, kde jsou momentálně proměnné využívány. Nejrychlejší frekvence spouštění akcí je jednou za sekundu.

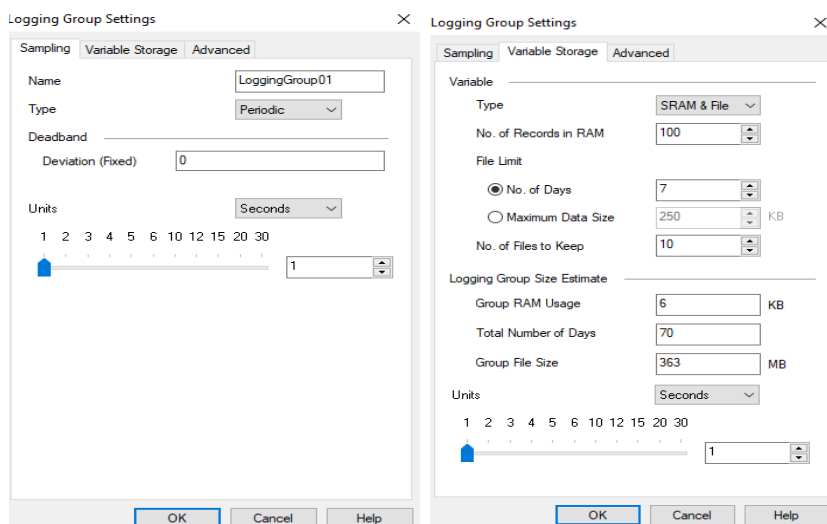
## 7.7. Komunikace programu Vijeo Designer

Jak bylo uvedeno, proměnné v programu Vijeo Designer jsou dvojího typu vnitřní a vnější. Vnější proměnné jsou hodnoty získané z externího zařízení, například měniče. Aby program mohl správně pracovat je nutné nastavit komunikace mezi zařízeními. K tomu slouží „IO Manager“. V „IO Manager“ je nutné vytvořit nové zařízení a nastavit parametry komunikace. Jelikož se jedná o komunikaci přes protokol Modbus TCP/IP je nutné nastavit IP adresu zařízení, ze kterého jsou hodnoty přijímány a dále parametry přijímaných proměnných, například pořadí bytů.



Obr. 43 Nastavení "IO Manager", program Vijeo Designer, Schneider Electric

Dalším krokem při získávání vnějších proměnných je vytvoření „Logging Group“, tedy skupiny externích proměnných. K vytvoření této skupiny externích proměnných slouží položka „Data Logging“. Po vytvoření této skupiny a přidání všech proměnných se nastavuje frekvence aktualizace hodnot a místo, kde se proměnné ukládají.



Obr. 44 Nastavení Logging group v programu Vijeo Designer, Schneider Electric

## 7.8. Skripty v programu Vijeo Designer

Vytváření skriptů je efektivní způsob provádění operací v programu Vijeo Designer. Skripty jsou úseky kódu v programovacím jazyku Java, které lze spustit v uživateli určený moment. Skripty, jak už bylo uvedeno, lze navázat na povel uživatele jako například stisknutí tlačítka. Předem definovaný skript lze spustit i bez povelu obsluhy. Skripty je možné spouštět automaticky po časových intervalech,

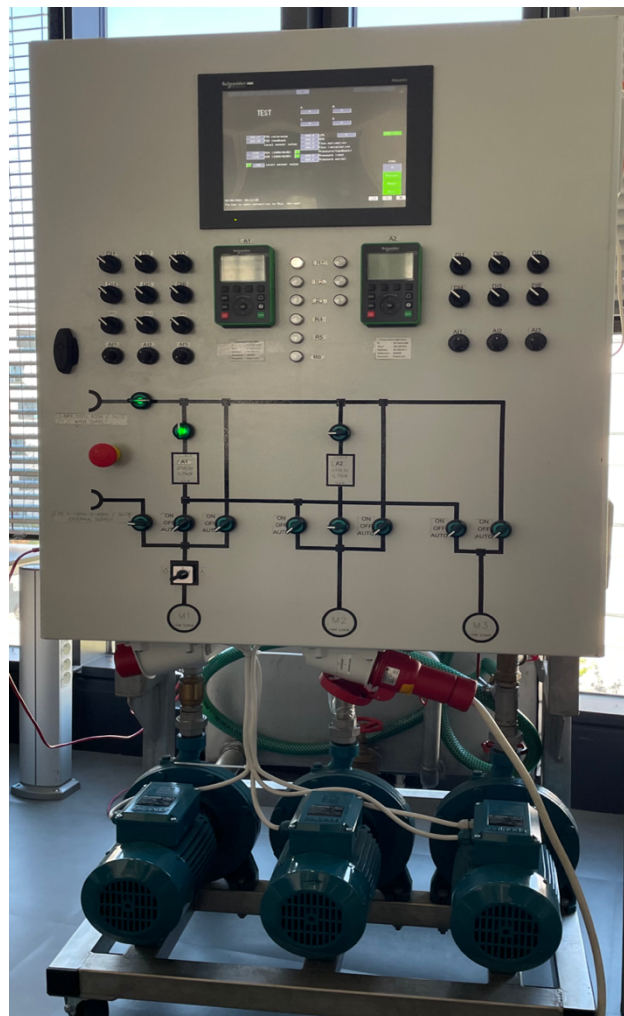
nebo po určité události např. přepnutí panelu. Skripty jsou vhodné pro práci s externími proměnnými, kdy hodnotu externí proměnné lze nahrát do lokální proměnné skriptu. Lokální proměnné skriptu se liší od vnitřních proměnných programu Vijeo Designer. Lokální proměnné ve skriptu zanikají v momentu jeho dokončení a nejsou nadále přístupné. Pro získávání hodnot vnitřních a vnějších proměnných v programu Vijeo Designer jsou implementovány vlastní funkce. Funkce `pressure.getIntValue()` slouží k získání hodnoty proměnné „pressure“. Pro zápis hodnoty do proměnné slouží funkce `pressure.write(10)`, která nahraje do proměnné „pressure“ hodnotu 10.



## 8. Model řízení paralelně zapojených čerpadel

Model pro účely řízení čerpadel je vytvořen na základě návrhu firmy Schneider Electric a slouží pro testování funkcí měničů, testování řízení čerpadel a implementace sledování procesních veličin. Podrobnější fotografie modelu lze najít v příloze I. Model pro řízení čerpadel obsahuje:

- Dva Měniče Altivar 630.
- Tři čerpadla zapojená paralelně z hlediska vodovodního systému.
- Obrazovku HMIGTO 6310.
- Vstupy -15 digitálních a 6 analogových.
- Stykače ovladatelné manuálně i automaticky.
- Nádrž s tlakovou nádobou.
- Senzor tlaku a průtoku.
- Ventily pro simulaci škrcení.
- Modul OTB.



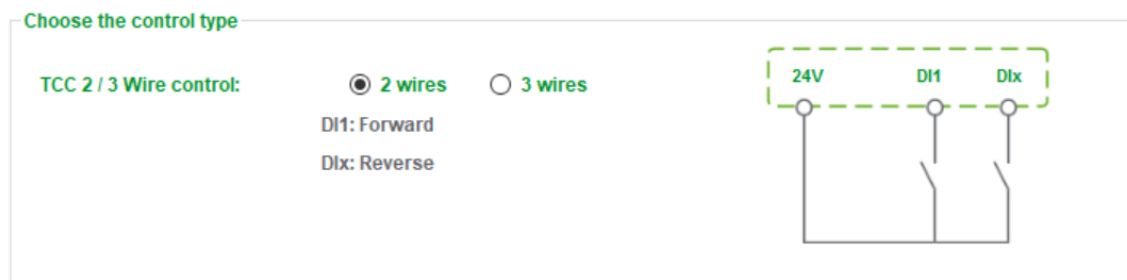
*Obr. 45 model pro řízení čerpadel*

## 8.1. Nastavení měniče pro řízení čerpadel

Vzhledem ke složitosti a rozsahu projektu byl zvolen postup nastavování měniče přes program SoMove, který nabízí přehledné grafické rozhraní a realizace je časově úspornější. První položkou pro nastavení měniče je zadávání štítkových hodnot motoru pohánějícího čerpadlo. V modelu jsou použita tři stejná čerpadla, takže do měniče stačí zadat štítkové údaje pouze jednou.

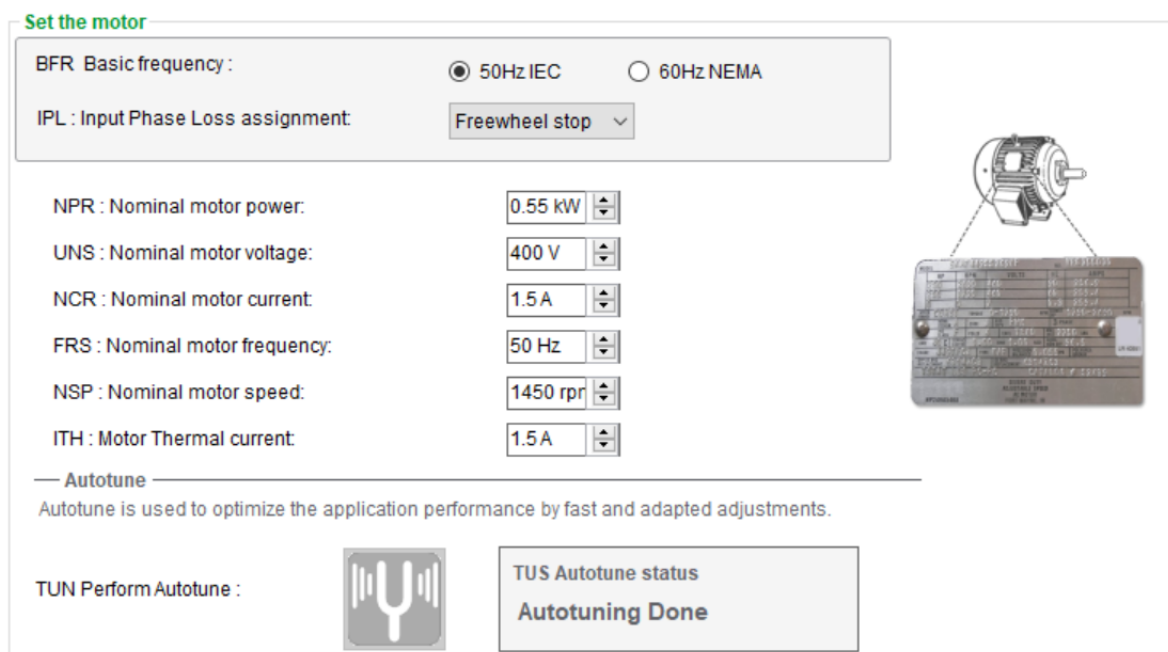
### 8.1.1. Zadání štítkových hodnot a autotuning

Před samotným zadáváním parametrů stroje je nutné vybrat parametr TCC 2/3 Wire control. Tento parametr má dvě možnosti nastavení. Při volbě „3-Wire control“ jsou umožněny 3 stavy chodu – Běh, Stop, Reverzace. Při zvolení parametru na „2-Wire control“ jsou stavy jen dva – Běh a Reverzace. Na obrázku níže jsou zobrazeny digitální vstupy, ke kterým jsou přiřazeny jejich stavy, např. digitální vstup DI1 – Běh



Obr. 46 Nabídka nastavení TCC 2/3 Wire control parametru, program SoMove, Schneider Electric

Následným krokem nastavení řízení je zadávání štítkových hodnot do tabulky. Po zadání hodnot je nutné spustit „Autotuning“, který optimalizuje řízení podle zjištěných informací z motoru.

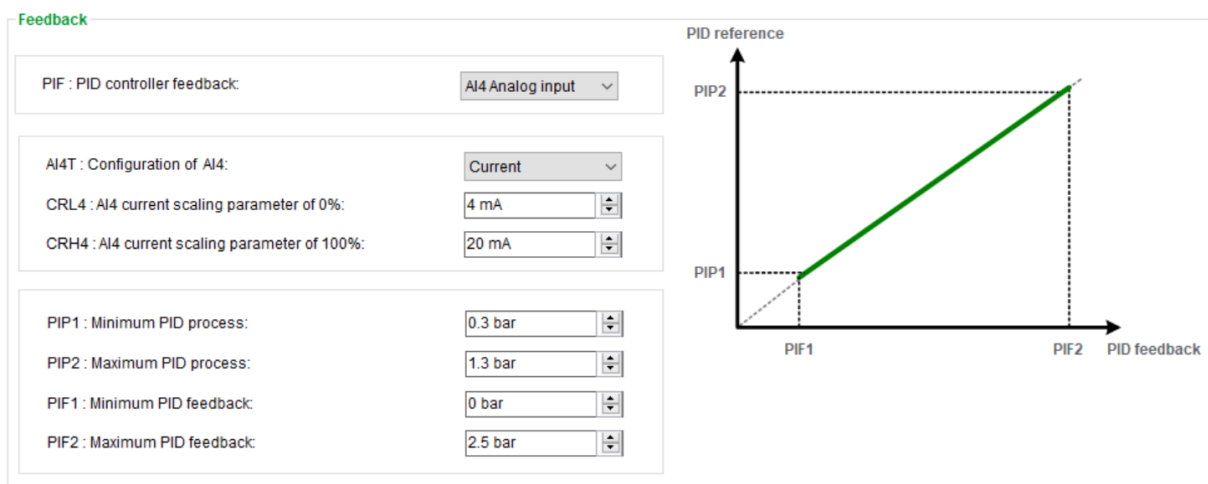


Obr. 47 Nastavení štítkových hodnot, program SoMove, Schneider Electric

### 8.1.2. Nastavení PI regulátoru v programu SoMove

V sekci PID regulátoru je nejdříve potřeba nastavit, podle jaké veličiny je PID regulátor nastaven. Je nutné nastavit, že model stroje s čerpadly je řízen podle reference tlaku. V další položce PID regulátoru se přiřazuje měřená hodnota tlaku analogovému vstupu. Analogový vstup byl připojen na vstup AI4. Typ analogového vstupu je zvolen podle tlakového senzoru. Tlakový senzor má proudový výstup v rozmezí 4 až 20 mA.

Maximální možný výstup PID regulátoru je nastaven podle možností vyvinutí tlaku všech čerpadel v paralelním chodu. Maximální vyvinutý tlak všech čerpadel se pohybuje v rozmezí 0,8- 1,3 bar v závislosti na utažení škrťacího ventilu.



Obr. 48 Nastavení PID odezvy, program SoMove, Schneider Electric

V nastavení PID regulátoru se dále nastavuje analogový vstup pro referenční hodnotu frekvence. Referenční hodnota je připojena na analogový vstup AI1. V nabídce je možné si zvolit jakýkoliv analogový vstup, pokud už nemá přiřazenou jinou funkci.

PII : Internal PID reference:	No
RPI : Internal PID reference:	0.7 bar
FR1 : Configuration reference frequency 1:	AI1 Analog input
FPI : Predictive speed reference:	Not configured
PSR : PID speed input % ref.	100 %

Obr. 49 Přiřazení referenční hodnoty PI regulátoru, program SoMove, Schneider Electric

Regulátoru je nutné zadat parametry proporcionální a integrační složky. Obě složky byly nastaveny na hodnotu 1. Vzhledem k tomu, že nastavené parametry splňují požadovanou přesnost a rychlost regulace, nebylo nutné provádět analýzu systému a provádět výpočet koeficientů.

RPG : PID Proportional gain:	<input type="text" value="1"/>
RIG : PID controller integral gain:	<input type="text" value="1"/>
RDG : PID derivative gain:	<input type="text" value="0"/>
PIS : PID integral disabled:	<input type="text" value="Not assigned"/>
PIC : PID inversion:	<input type="text" value="No"/>
POL : PID controller min. output:	<input type="text" value="0 Hz"/>
POH : PID controller max. output:	<input type="text" value="60 Hz"/>

Obr. 50 Nastavení koeficientů PI regulátoru, program SoMove, Schneider Electric

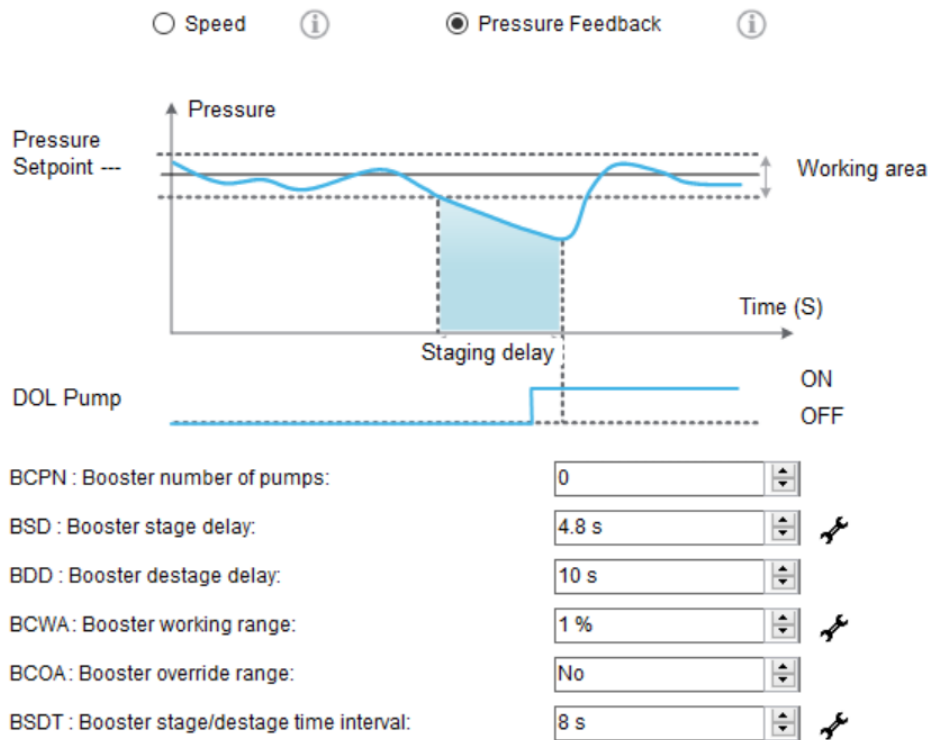
### 8.1.3. Nastavení Booster Control

Booster Control je systém ovládání více čerpadel. Nejdříve je nutné v záložce architektury systému nastavit počet čerpadel v systému a přiřadit jim jednotlivé stykače. Při nastavování stykačů je důležité ověřit správnost přiřazení stykačů tak, aby přiřazené stykače v programu odpovídaly skutečnému obvodu.

MPPN : Number of pumps:	<input type="text" value="3"/>	
	<b>Output assignment</b>	<b>Interlock assignment</b>
Pump 1	<input type="text" value="Relay R2"/>	<input type="text" value="Not assigned"/>
Pump 2	<input type="text" value="Relay R3"/>	<input type="text" value="Not assigned"/>
Pump 3	<input type="text" value="Relay R4"/>	<input type="text" value="Not assigned"/>

Obr. 51 Přiřazení stykačů k řízení čerpadel, program SoMove, Schneider Electric

V záložce nastavení je nutné vybrat veličinu, podle které je model řízen. V tomto případě se jedná o řízení podle úrovně tlaku v systému. Dalšími parametry jsou časy mezi změnou počtu čerpadel v běhu, tolerance regulační odchylky nebo doba, po kterou je skutečná hodnota tlaku mimo toleranční pásmo odchylky a kdy model nezmění počet čerpadel v běhu.



Obr. 52 Nastavení Booster Control, program SoMove, Schneider Electric

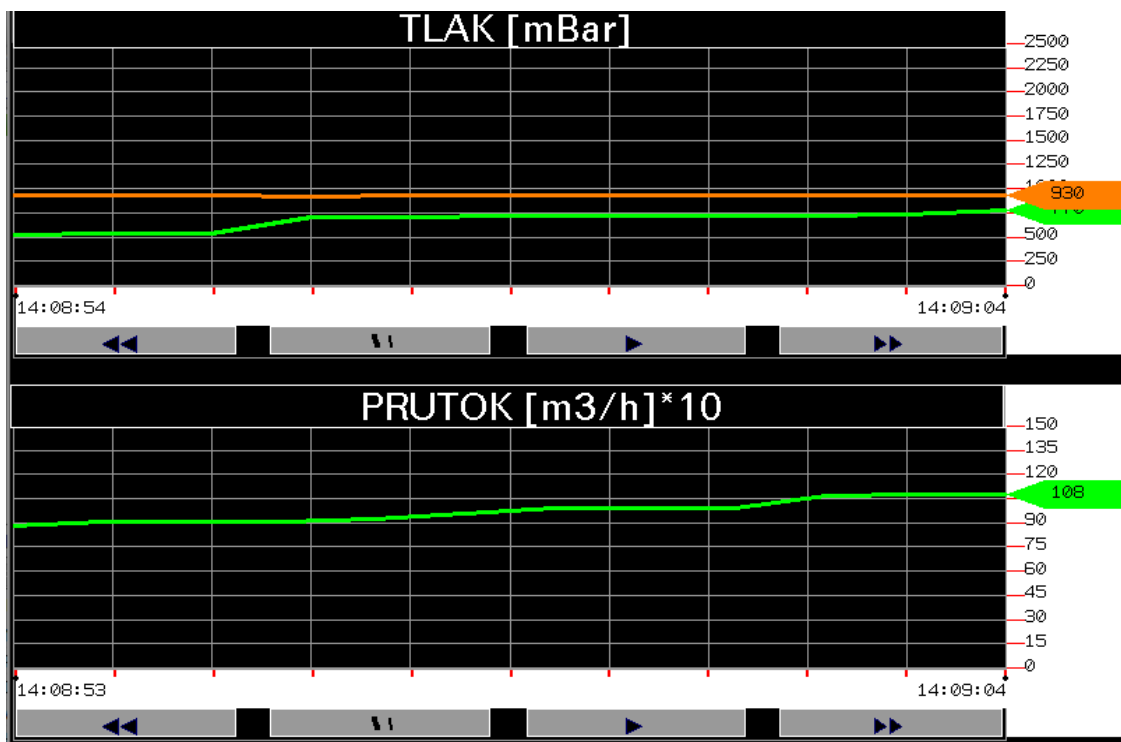
## 9. Monitorování procesů v programu Vijeo Designer

Jak již bylo uvedeno, návrh monitorování procesních veličin se odvíjí od konkrétní situace v místě aplikace. Měníče řady Altivar mají v paměti více než 1700 parametrů, které lze monitorovat. Je tedy jasné, že není možné všechno přehledně zobrazit. Během návrhu monitorování stavů modelu řízení čerpadel je nutné uvažovat, co všechno lze sledovat a jaké veličiny a stavy je vhodné zobrazit. Hlavní podmínkou pro návrh vizualizace je, aby byly známy všechny potřebné veličiny pro řízení stroje.

Před zahájením nebo během tvorby grafických panelů je nutné definovat komunikační protokol a zadat IP adresy zařízení, se kterými bude obrazovka komunikovat. V tomto projektu musí obrazovka komunikovat s měničem, ze kterého jsou získávána data ohledně chodu motoru, stavu systému nebo hodnoty digitálních vstupů. Dále projekt komunikuje s modulem OTB. Modul OTB získává informace o stavu stykačů. Všechna zařízení (měnič, modul OTB, obrazovka) spolu komunikují přes protokol Modbus TCP/IP.

### 9.1. Panel sledování tlaku a průtoku

Model s paralelně zapojenými čerpadly je navržen tak, aby byl řízen na základě úrovně tlaku v potrubním systému. Je tedy jisté, že jednou ze sledovaných veličin bude tlak. Vzhledem k tomu, že regulace nebývá vždy dokonalá, je sledována referenční a naměřená hodnota tlaku. Jelikož je sledován proces regulace, je vhodné zobrazit časový průběh regulované veličiny. Tím bude sledována rychlost odezvy systému a rychlost regulace. Pro porovnání skutečné a požadované hodnoty tlaku je vhodné



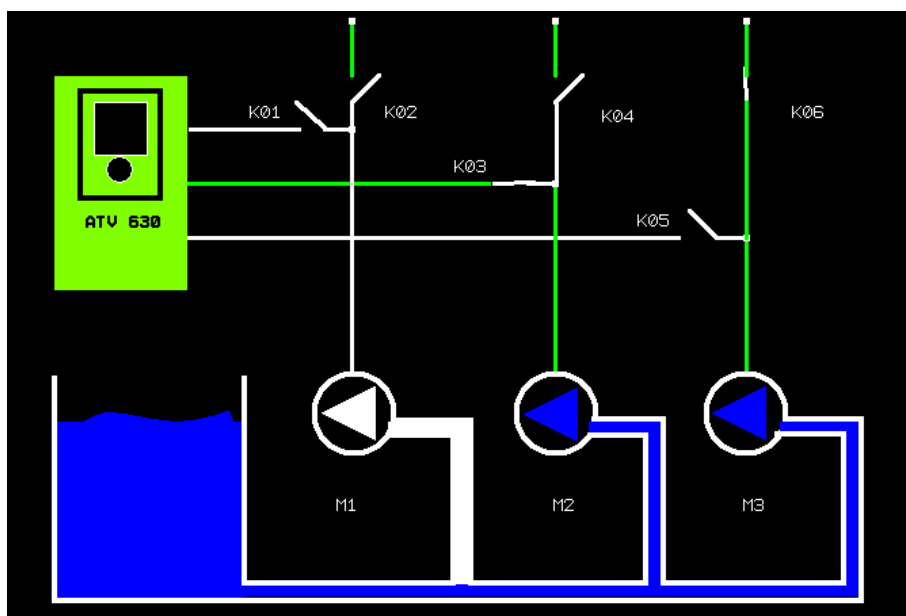
Obr. 53 Grafický panel pro zobrazování průběhů tlaku a průtoku v programu Vijeo Designer

umístit oba průběhy do jednoho grafu. Tak bude zřejmé, jak dobře funguje PI regulátor a jakých úrovní tlaků je možné dosáhnout paralelně zapojenými čerpadly. Aby obsluha stroje měla přehled o kompletních parametrech, které se vyvíjí v čase, je dobré umístit i průběh průtoku na stejný panel jako průběhy referenční a skutečné hodnoty tlaku. Tím budou veličiny sledované v čase na jednom grafickém panelu.

Obrazovka pro sledování průběhů tlaku a průtoku byla vytvořena pomocí tzv. Plot Trendů. Tyto Plot Trendy umožňují sledování veličin v čase a jejich vykreslování s ukazatelem aktuální hodnoty. Jejich výhodou je možnost zastavení vykreslování dat s možností posunu zpět v časové ose, tím lze prozkoumat předchozí děje. Plot Trendy jsou problematické v zobrazování hodnot, které obsahují desetinná místa. Pro správné zobrazení je nutné provést přepočítání naměřené veličiny. Hodnoty naměřené a požadovaného tlaku, které jsou získávány z měniče mají rozsah pouze od nuly do tisíce. To neumožňuje zobrazit celý rozsah naměřených hodnot, proto jsou získané hodnoty z měniče vynásobeny deseti. Po vynásobení je získána proměnná, která odpovídá naměřené hodnotě v milibarech. Pro zobrazení průběhu nebyl možný přepočítání do některých základních jednotek, tudíž v grafu je zobrazovaná hodnota, která odpovídá desetinásobku naměřené hodnoty

## 9.2. Panel zobrazující stavy stykačů

Jak bylo uvedeno v kapitole, která popisuje řízení čerpadel pomocí funkce Booster Control, měnič Altivar dokáže sám spínat čerpadla. Spínání čerpadel je dáno vnitřní logikou v měniči, tudíž není jasné, které čerpadlo se sepne jako první, resp. které bude mít řízené otáčky. Proto byla vytvořena obrazovka zobrazující stav stykačů a čerpadel v běhu. Obrazovka obsahuje šest větví reprezentující vodiče vedoucí z třífázové sítě a vodiče vedoucí z měniče. Každá větev je rozpojena stykačem a odpovídající fáze jsou za stykači spojené. Stavy stykačů na obrazovce se odvíjí od informace, která je přijímána z modulu OTB. Modul OTB vysílá informaci o stavech stykačů pomocí proměnné typu INT (16 bitů).

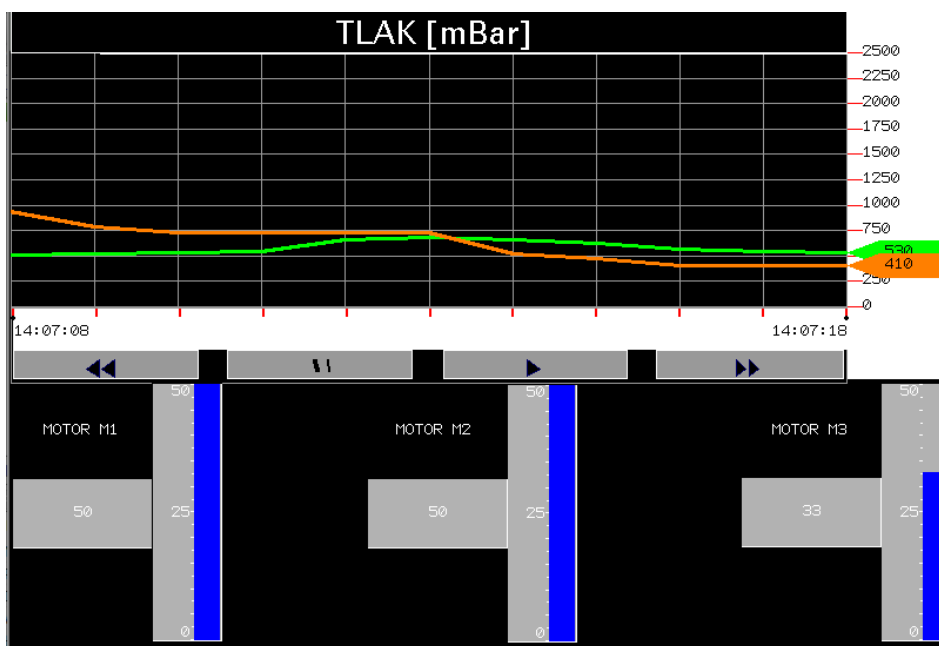


Obr. 54 Grafický panel zobrazující stavy stykačů a čerpadla v běhu v programu Vijeo Designer

Po přijetí informace o stavech stykačů je nutné přiřadit odpovídající bit z modulu OTB proměnné v programu Vijeo Designer. Pomocí vytvořené proměnné se dále natáčí stykač na panelu v závislosti na logické hodnotě proměnné. Po implementaci zobrazení stykačů na panelu se určí, jaké čerpadlo je v běhu. To je provedeno kontrolou stavu stykačů na jednotlivé fázi.

### 9.3. Panel zobrazující frekvenci napětí

Tento panel se skládá ze sloupcových grafů, které sledují frekvenci napájecího napětí na určitém motoru. Pokud jsou v chodu všechna tři čerpadla jsou ve dvou grafech zobrazeny maximální hodnoty - tedy 50 Hz. Společně se sloupcovými grafy je na panelu použitý Plot Trend pro sledování naměřeného tlaku v systému. Při zobrazení časového průběhu tlaku a sloupcových grafů frekvencí motorů je možné přehledně sledovat jakou odezvu na systém má změna počtu čerpadel nebo změna frekvence řízeného čerpadla. Takto je možné sledovat, jestli je v systému nějaká chyba, například pokud všechna čerpadla běží na 50 Hz a dochází k poklesu tlaku.



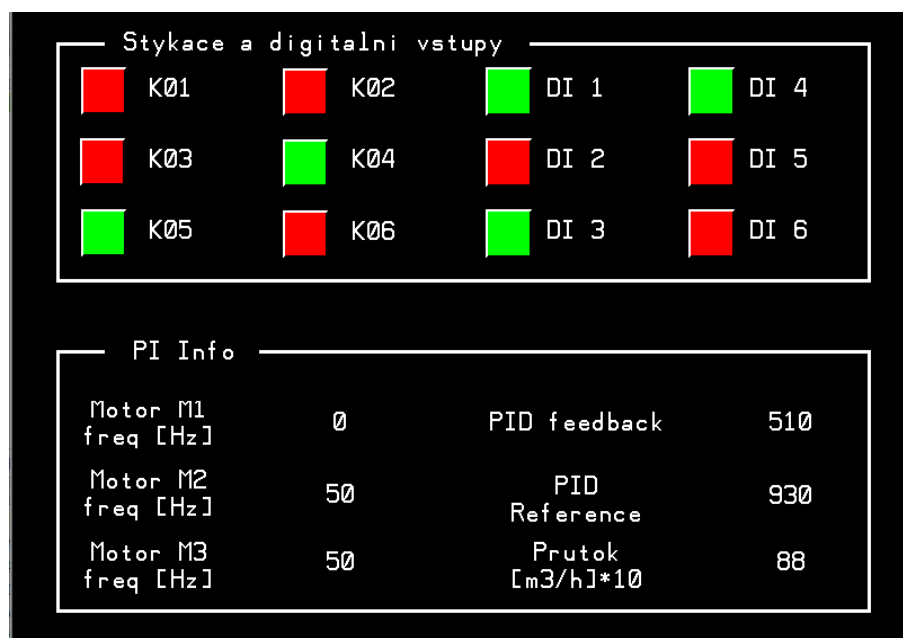
Obr. 55 Grafický panel se sloupcovými grafy se sledováním tlaku v systému, program Vijeo Designer

### 9.4. Informační panel

U řídicích aplikací je zajiště vhodné, aby při sledování procesu bylo zajištěno sledování všech parametrů na jednom místě. Tím bude mít obsluha snadnější kontrolu nad procesy v řízeném modelu. Z tohoto důvodu byl vytvořen grafický panel obsahující sledovaná data z ostatních panelů. Na tomto panelu jsou zobrazeny stavy stykačů, které jsou spínány automaticky přes logiku měniče nebo digitální vstupy, které řídí obsluha stroje. Dále jsou na panelu zobrazeny informace vztažené k procesu řízení.



V této sekci jsou zobrazeny frekvence napájení všech tří motorů a dále je zobrazena hodnota referenční hodnoty regulátory a také hodnota zpětné vazby. Pro úplnost informací je zobrazena i hodnota průtoku, která je důležitou veličinou pro pochopení průběhu tlaku v systému.



Obr. 56 Informační grafický panel v programu Vijeo Designer

## 9.5. Panel zobrazující charakteristiky čerpadel

Tvar charakteristiky řízeného čerpadla je dynamicky měnící se parametr. Velikost charakteristiky se odvíjí od velikosti frekvence napájení čerpadla. S rostoucí frekvencí se zvyšuje jak tlak vytvořený čerpadlem, tak i průtok. Pro zobrazení čerpadlové charakteristiky byly využity předpoklady, že charakteristika čerpadel má tvar elipsy a růst průtoku je úměrný růstu frekvence a tlak je úměrný kvadrátu napájecí frekvence. Tedy, pokud je změna průtoku úměrná poměru napájecí frekvence ku jmenovité hodnotě frekvence a změna výstupního tlaku je úměrná kvadrátu frekvence a jmenovité frekvence. Po implementaci zjednodušujících předpokladů lze získat jednotlivé složky tlaku a průtoku. Jelikož se celková charakteristika bude pohybovat po elipse v první kvadrantu, lze jednotlivé složky vypočítat pomocí následujících rovnic:

$$p = p_{max} \left( \frac{f}{f_n} \right)^2 \cos(\alpha) \quad (7)$$

$$q = q_{max} \left( \frac{f}{f_n} \right) \sin(\alpha), \quad (8)$$

kde

$p_{max}$  ... je největší naměřený tlak v systému [Bar]

$q_{max}$ ...je největší naměřený průtok od jednoho čerpadla [ $m^3hod^{-1} \cdot 100$ ]

$f_n$  ... je jmenovitá frekvence [Hz]

$f$ ...je aktuální frekvence [Hz]

$\alpha$ ...je úhel, který začíná na ose tlaku a pohybuje se směrem k ose průtoku [rad]

Tyto rovnice vyjadřují průběhy pouze pro jednu charakteristiku čerpadla. Model řízení čerpadel obsahuje tři čerpadla a je potřeba zobrazit výsledné charakteristiky paralelní práce čerpadel. Čerpadla, která jsou připojena k napětí přímo ze sítě mají stálé otáčky. Tedy jejich zobrazení je jednoduché, stačí naměřit nejvyšší průtok  $q_{max}$  a tlak  $p_{max}$ , který dokáže jedno čerpadlo vyvinout. Pomocí naměřených hodnot se získá charakteristika daná rovnicemi:

$$p = p_{max} \cos(\alpha) \quad (9)$$

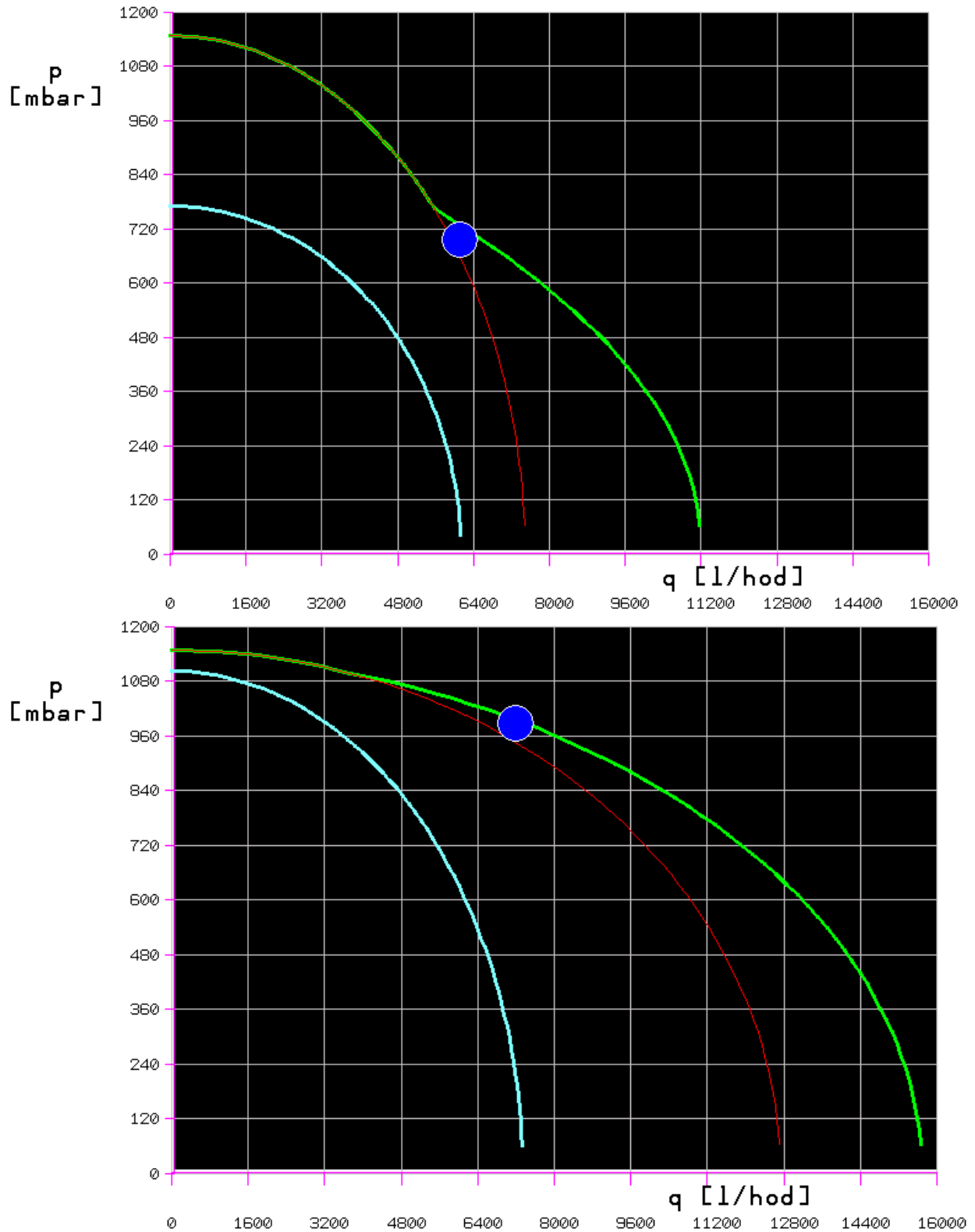
$$q = q_{max} \sin(\alpha), \quad (10)$$

Pro výslednou charakteristiku paralelní práce čerpadel je nutné sečíst hodnoty průtoků z řízeného čerpadla a čerpadla přímo připojeného na síť. Nicméně podle fyzikálních zákonů paralelní spolupráce čerpadel lze počítat průtoky čerpadel pouze od úrovně nejvyššího dosaženého tlaku čerpadla s charakteristikou začínající na nižší úrovni tlaku.

Pro vykreslení čerpadlových charakteristik byl využit objekt „XYGraph“, který vykresluje souřadnicové grafy. Tento typ grafu pracuje s datovým typem pole (array) o délce 256 bytů. Do tohoto pole se vkládají hodnoty typu INT o délce dvou bytů (Int16), tedy do pole může být umístěno pouze 128 hodnot. V těchto 128 hodnotách musí být informace o souřadnicích x i y složky, to znamená, že maximální počet bodů v tomto grafu je 64. Pro vykreslení charakteristiky je nutné rozdělit křivku na 64 dílků, proto je interval úhlu  $\alpha$  rozdělen na 64 dílků. Tím nastává problém, protože charakteristiky jsou rozděleny na stejný počet dílků, ale není možné počítat hodnoty polí na stejných pozicích z důvodů různých hodnot tlaků při nulovém průtoku. Řešením je zjistit na kolikáté pozici v poli se dostává vyšší charakteristika pod počáteční úroveň té menší. Po zjištění pozice, na které se úrovně potkají, rozdělit menší charakteristiku na počet zbývajících pozic vyšší charakteristiky a sečíst jejich hodnoty na odpovídajících pozicích charakteristik. Tím bude dosaženo toho, že vykreslení výsledného pole bude mít podobný charakter jako charakteristika paralelně zapojených čerpadel s různými parametry.

Při paralelní kombinaci čerpadel se zvyšuje průtok. Nicméně celkový průtok není rovný součtu průtoků jednotlivých čerpadel. V systému se vlivem zvýšeného průtoku zvětší i ztráty, které zmenší celkový průtok. Proto je nutné naměřit maximální průtok při spojení dvou i tří čerpadel a napočítat koeficienty, kterými je nutné roznásobit celkový průtok.

Na panelu s křivkami je umístěn i bod, který znázorňuje, kde se zrovna nachází systém. Jedná se o jednoduchý grafický prvek, který se pohybuje v horizontálním i vertikálním směru podle hodnoty průtoku, resp. tlaku v systému. Poté je nutné experimentálně napočítat rozsah pohybu v obou osách.



Obr. 57 Charakteristiky čerpadel, nahoře při chodu dvou čerpadel a dole při chodu tří, Modrá – charakteristika řízeného čerpadla, červená - charakteristika bez řízeného čerpadla, zelená - celková charakteristika

## 10. Závěr

V teoretické části diplomové práce jsou popsány typy čerpadel a jejich technologické veličiny. Typy čerpadel byly rozděleny do dvou kategorií – hydrostatická a hydrodynamická. Následně jsou popisovány technologické veličiny hydrodynamického čerpadla v závislosti na průtoku pracovní tekutiny v systému. V práci je popsáno, jak se mění technologické veličiny v závislosti na otáčkách čerpadla. Teoretická část se dále věnuje společné práci více čerpadel v sériovém nebo paralelním zapojení čerpadel z hlediska potrubního systému. U sériového zapojení jsou popsány hlavní vlastnosti tohoto spojení. U paralelního spojení jsou popsány jevy způsobené danou kombinací, například nelineární nárůst průtoku při zvýšení počtu čerpadel. Dále je popsán způsob regulace podle úrovně tlaku a znázorněn pohyb pracovního bodu při této regulaci a jevy způsobené přechodem pracovního bodu do jiné úrovně a způsoby, jak tyto jevy odstranit. V práci se dále uvádí různé způsoby regulace, které se dělí do dvou kategorií – s proměnnými otáčkami a s konstantními otáčkami. Jsou uvedeny výhody i nevýhody jednotlivých regulací a možné důvody jejich použití.

Součástí práce bylo vytvoření automatizovaného řízení na modelu tří čerpadel s frekvenčním měničem. Řízení čerpadel bylo implementováno na frekvenčním měniči Altivar 630 od firmy Schneider Electric. Z popsanych možností, jak nastavit regulaci na měniči Altivar, byla zvolena možnost nastavování parametrů v programu SoMove. V diplomové práci je popsán postup pro nastavení řízení paralelního zapojení čerpadel. Hlavními funkcemi pro nastavení řízení jsou tzv. Booster Control a PID regulátor. V Booster Control sekci se nastavují parametry jako jsou například časy mezi sepnutím čerpadel. V sekci PID regulátor se nastavují parametry jako jsou například saturace vstupu a výstupu nebo koeficienty složek regulátoru.

Model řízení čerpadel obsahuje i grafický panel pro zobrazování technologických veličin nebo stavů stroje. Pro zvýšení přehlednosti sledování stavů stroje byla vytvořena koncepce monitorování veličin. V této koncepci jsou popisována pravidla, kterými by se měl programátor grafického rozhraní řídit při návrhu zobrazování. Mezi uvedená pravidla patří například pravidlo říkající, že je vhodné zobrazovat položky, které jsou důležité pro ovládání a nezobrazovat veškeré informace, které by snižovaly přehlednost, nebo pravidlo říkající, aby programátor udržoval jednotnou orientaci v programu.

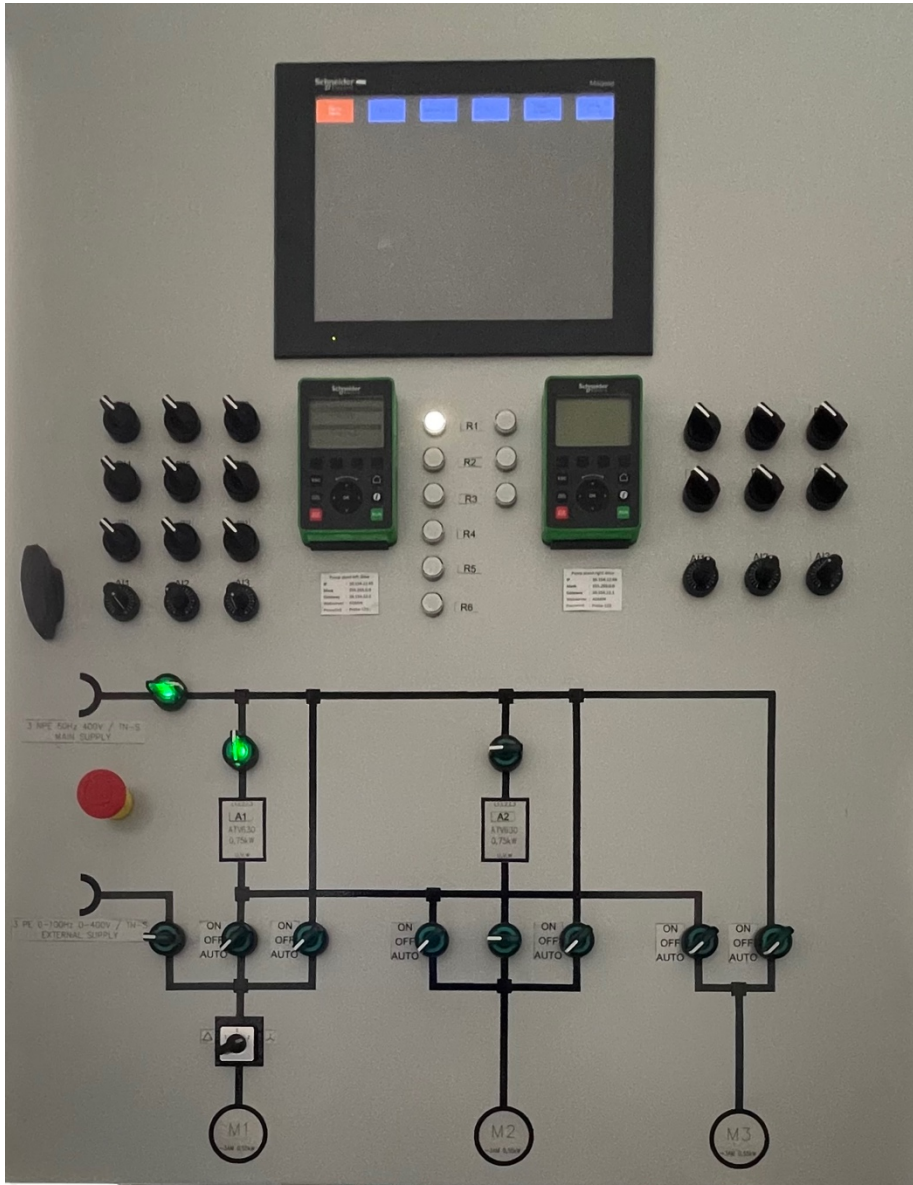
Pro vizualizaci procesů je použit grafický panel HMIGTO 6310 od firmy Schneider Electric. Grafické rozhraní je vytvořeno v programu Vijeo Designer. Pro monitorování stavů a veličin modelu řízení čerpadel bylo vytvořeno několik grafických panelů. Na prvním panelu se vykreslují průběhy tlaku a průtoku v čase. V grafu průběhu tlaku je zobrazena i referenční hodnota tlaku, a tak je možné sledovat průběh regulace v čase. Druhý panel obsahuje informace ohledně polohy stykačů na modelu. Sledování polohy stykačů je důležité, protože funkce frekvenčního měniče umožňuje ovládat stykače automaticky. Třetí panel je doplňkem toho prvního. Na tomto panelu jsou zobrazeny sloupcové grafy reprezentující vstupní frekvence a graf sledující proces regulace tlaku. Tak je možné sledovat vliv frekvence stroje na

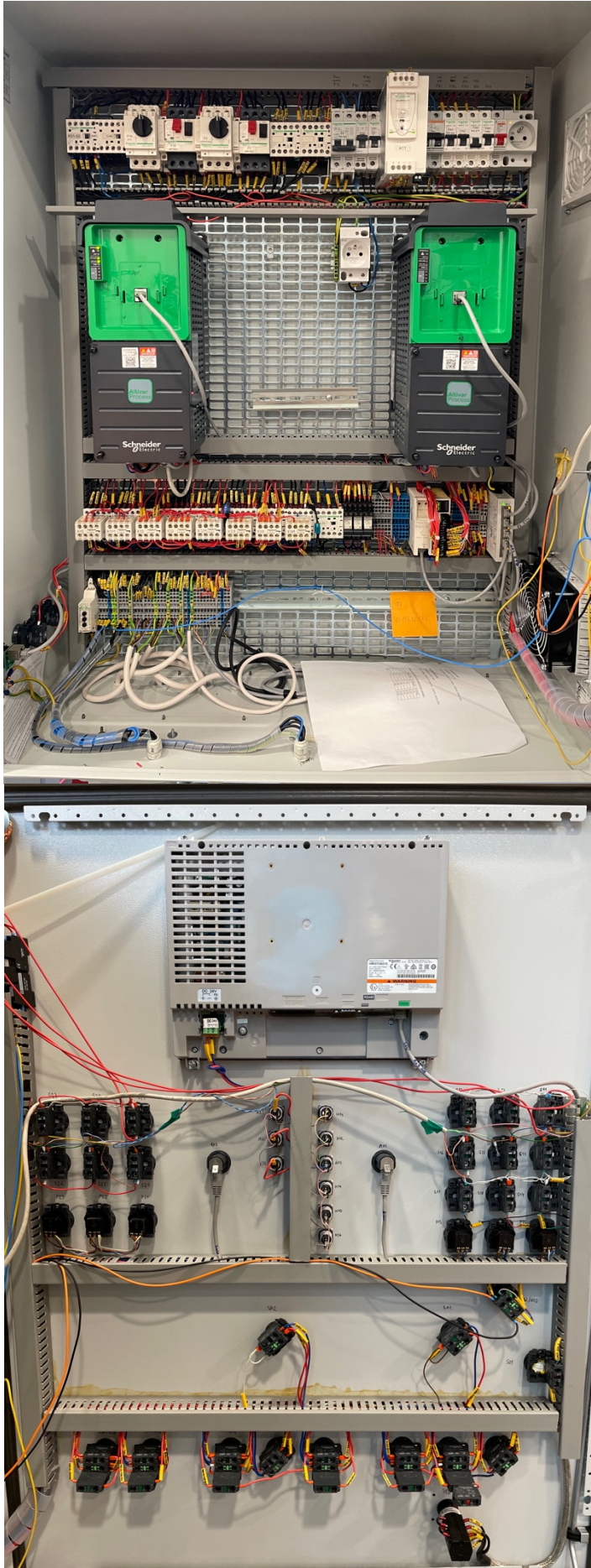
tlak v systému. Čtvrtý panel byl vytvořen za účelem zobrazení všech sledovaných stavů v modelu. Tento panel ukazuje stavy stykačů a digitálních vstupů a také informace o PI regulátoru, jako jsou například aktuální hodnoty průtoku, tlaku nebo frekvence motoru. Na posledním panelu jsou zobrazeny charakteristiky čerpadel s vyznačeným bodem aktuální polohy systému. Tento panel může sloužit k vyznačení stavů systému, kdy dochází k malému průtoku, který by nedostatečně ochlazoval čerpadlo, nebo k malému tlaku, který by znamenal nebezpečí vzniku kavitace u lopatek čerpadla.

## Přílohy

### I. Fotografie modelu řízení čerpadel









II. Tabulka použitých parametrů měniče v programu Vijeo Designer a jejich adresy

<b>Zařízení</b>	<b>Název parametru</b>	<b>Zkratka</b>	<b>Adresa</b>
<b>Altivar 630</b>	Logic inputs states	IL1R	5202
<b>Altivar 630</b>	Motor frequency	RFR	3202
<b>Altivar 630</b>	PID feedback	RPF	11981
<b>Altivar 630</b>	PID refernce	RPC	11982
<b>Altivar 630</b>	Pump flow value	FS2V	15716
<b>OTB</b>	-	-	0

## Použité zdroje

- [1] Bláha, J, Brada, K. Hydraulické stroje SNTL - Nakladatelství technické literatury, Praha 1992, ISBN 80-03-00665-1.
- [2] Vojáček, A. Principy průmyslových čerpadel - 4. díl - odstředivá čerpadla, článek na webovém portálu [www.automatizace.hw.cz](http://www.automatizace.hw.cz), Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/principy-prumyslovych-cerpadel-4dil-odstrediva-cerpadla>
- [3] Kočárník, P. ČVUT v Praze, Katedra elektrických pohonů a trakce, studijní materiály k předmětu „Strojní Struktury Elektráren“
- [4] Nemrava, J. Aplikace HD podobnosti při návrhu hydrodynamického čerpadla, Vysoká škola Báňská, Technická Univerzita Ostrava, Fakulta Strojní, Diplomová práce, Ostrava 2014
- [5] Čejka, P. Konstrukční provedení čerpadel, Vysoké Učení Technické v Brně, Fakulta Strojní Inženýrství, Energetický ústav, Bakalářská práce, Brno 2009
- [6] International office of water, Technical Series 17, „Pressure Boosters, principle, application, sizing“, 1999
- [7] J. Schonek, „Cashier technique No. 214, Energy efficiency: benefits of variable speed control in pumps, fans and compressors“. Schneider Electric, 2008.
- [8] Bláha, J, Brada, K. Hydraulické stroje SNTL - Nakladatelství technické literatury, Praha 1992, ISBN 80-03-00665-1.
- [9] Schneider Electric Industries SAS, „Altivar Process ATV600, Application Note, Multi-Masters Booster Control with Pressure Feedback, 01/2017“.
- [10] Schneider Electric Industries SAS, „Variable speed drives Altivar Process ATV600 Catalog November 2018“.
- [11] Schneider Electric Industries SAS, „Altivar Process ATV600, Variable speed drives, Programming Manual 05/2019“.
- [12] Bodnar, D., AVG, Avast Software s.r.o., „what is TCP/IP?“,2021. Článek na webové stránce, Dostupné z: <https://www.avg.com/en/signal/what-is-tcp-ip>
- [13] Control Solutions Minnesota, Ltd., „Modbus 101 - Introductin to Modbus“. Článek na webové stránce, Dostupné z: [https://www.csimn.com/CSI\\_pages/Modbus101.html](https://www.csimn.com/CSI_pages/Modbus101.html)
- [14] iPC2U s.r.o., „Podrobný popis protokolu Modbus TCP s příklady příkazů“, pro. 14, 2020. Článek na webové stránce, Dostupné z: <https://ipc2u.cz/blogs/news/podrobny-popis-protokolu-modbus-tcp-s-priklady-prikazu>
- [15] Csaniy, E. Comparison of 4 different flow control methods of pumps, Článek na webové stránce, Dostupné z: <https://electrical-engineering-portal.com/comparison-of-4-different-flow-control-methods-of-pumps>
- [16] Michael Smith Engineers, Ltd., Článek na webové stránce, Dostupné z: <https://www.michael-smith-engineers.co.uk/resources/useful-info/air-operated-double-diaphragm-pumps>