

Řízení zásobování vytlačovací linky regranulátem

Svjatoslav Treťak

Bakalářská práce
2022



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav automatizace a řídicí techniky

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Svjatoslav Treťak
Osobní číslo: A19586
Studijní program: B3902 Inženýrská informatika
Studijní obor: Inteligentní systémy s roboty
Forma studia: Kombinovaná
Téma práce: Řízení zásobování vytlačovací linky regranulátem
Téma práce anglicky: Regranulate Supply Control of the Extrusion Line

Zásady pro vypracování

1. Proveďte analýzu současného stavu zásobování vytlačovací linky regranulátem a popište „slabá“ místa a možnosti jejich posílení.
2. Proveďte literární rešerši k možnému řešení existujícího problému v zásobování po stránce technologické, měřicí, regulační, a to hardwarové i softwarové.
3. Navrhněte způsob zlepšení rovnoměrného zásobování linky regranulátem tak, aby mohly být vyloučeny zásahy lidské obsluhy.
4. Pro navržený způsob navrhněte řešení jak hardwarové, tak softwarové stránky věci.
5. Navržené řešení regulace výšky hladiny regranulátu v silu simulačně ověřte.
6. Proveďte ekonomickou analýzu navržených nezbytných úprav současného zařízení.

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. ĎAĎO, S. a M. KREIDL. *Senzory a měřicí obvody*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999, 315 s. ISBN 80-010-2057-6.
2. Šulc, B., Vítečková, M.: *Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů*. Vydavatelství ČVUT, Praha, 2004
3. Vítečková, M.: *Seřízení regulátorů metodou inverze dynamiky*. Skriptum VŠB-TU Ostrava, 1998, ISBN 80-7078-628-0
4. Vašek, V.: *Teorie automatického řízení II*. Skriptum FT VUT v Brně, Zlín 1990
5. MAŇAS, M., STANĚK, M., MAŇAS, D. *Výrobní stroje a zařízení. Stroje gumárenské a plastikařské I*. Zlín, 2007.
6. MARTINÁSKOVÁ, M., ŠMEJKAL, L: *Řízení programovatelnými automaty*, skriptum ČVUT FSI, Praha 1998, Praha 2004

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.**
Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. ledna 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **20. května 2022**

doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D. v.r.
děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 15. ledna 2022

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne: 15.5. 2022

Svjatoslav Treťak, v.r.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem způsobu řízení zásobování vytlačovací linky regranulátem. V první části práce je stručně popsána celá linka a podrobněji všechny její části spojené s řízením zásobování. Dále jsou popsány způsoby spojitého měření výšky hladiny sypkých materiálů a základní typy regulátorů. Pro navržené řešení je vytvořený simulační model, ve kterém je ověřena funkčnost návrhu.

Klíčová slova: Řízení výšky hladiny, vícepolohová regulace, spojité měření výšky hladiny, automatizace.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the design of a method of controlling the supply of regranulate extrusion line. The first part of the thesis briefly describes the whole line and in more detail all its parts related to supply management. Methods of continuous level measurement and basic types of regulators are also described. A simulation model is created for the proposed solution, in which the functionality of the design is verified.

Keywords: Level control, multi-position control, continuous level measurement, automation.

Rád bych touto cestou poděkoval mému vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Vladimíru Vaškovi, CSc. za odborné vedení, cenné rady a pomoc při vypracování této práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 POPIS VÝROBNÍ LINKY INLINE 21	11
1.1 SILO PRO UCHOVÁNÍ REGRANULÁTU	13
1.2 MALÝ ZÁSOBNÍK S REGRANULÁTEM	15
1.3 DÁVKOVACÍ ZAŘÍZENÍ.....	15
1.4 NEDOSTATKY MANUÁLNÍHO ŘÍZENÍ POMĚRU DÁVKOVÁNÍ	17
1.4.1 Vliv podílu složky regranulátu na kvalitu výroby.....	17
1.4.2 Nízké procento složky regranulátu.....	18
1.4.3 Vysoké procento složky regranulátu	18
1.5 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	18
2 SENZORY V PRŮMYSLOVÉ VÝROBĚ	19
2.1 MĚŘENÍ VÝŠKY HLADINY SYPKÝCH MATERIÁLŮ	19
2.1.1 Ultrazvukové hladinoměry	20
2.1.2 Radarové (mikrovlnné) hladinoměry	21
2.1.3 Kapacitní hladinoměr	21
2.1.4 Laserové hladinoměry	22
2.1.5 Radioizotopové hladinoměry	23
2.2 VYBRANÝ TYP HLADINOMĚRU	24
3 AUTOMATIZACE	25
3.1 REGULAČNÍ OBVOD	25
3.2 DVOUPOLOHOVÁ A TŘÍPOLOHOVÁ REGULACE.....	26
3.2.1 Třípolohový regulátor s penalizací akční veličiny	28
3.3 PID REGULÁTORY	29
3.3.1 Proporcionální složka regulátoru	29
3.3.2 Integrovaná složka regulátoru	30
3.3.3 Derivační složka regulátoru	31
3.4 PI REGULÁTOR	31
3.5 PD REGULÁTOR.....	32
3.6 PID REGULÁTOR	32
3.7 PROGRAMOVATELNÝ LOGICKÝ AUTOMAT (PLC)	33
3.8 POUŽITÝ ZPŮSOB REGULACE	33
II PRAKTICKÁ ČÁST	34
4 VYTVOŘENÍ MATEMATICKÉHO MODELU SILA	35
4.1 VÝPOČET OBJEMU SILA	35
4.2 APROXIMACE VSTUPNÍCH HODNOT.....	36
4.2.1 Objemový tok vstupní veličiny	36
4.3 MATEMATICKÝ POPIS SILA	37
4.4 OVĚŘENÍ MATEMATICKÉHO MODELU	40
5 REGULAČNÍ ALGORITMUS	42

5.1	POPIS PORUCH VSTUPUJÍCÍCH DO REGULOVANÉHO SYSTÉMU	42
5.2	LIMIT AKČNÍHO ZÁSAHU.....	43
5.2.1	Nevýhody omezení akční veličiny	43
5.3	NAVRŽENÝ ALGORITMUS	43
5.4	MODEL REGULAČNÍHO OBVODU	46
5.5	OVĚŘENÍ REGULAČNÍHO OBVODU	48
5.6	VOLBA PERIODY VZORKOVÁNÍ.....	51
5.7	REÁLNÉ PŮSOBNÍ PORUCHY.....	52
5.8	NASTAVENÍ PARAMETRŮ.....	54
6	NÁVRH ÚPRAV A ZHODNOCENÍ.....	55
6.1	VYBRANÝ HLADINOMĚR.....	55
6.2	POŽADAVKY NA ÚPRAVU PROGRAMU.....	56
6.3	NÁKLADY NA REALIZACI.....	56
6.4	OČEKÁVANÉ ÚSPORY	57
6.5	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	58
	ZÁVĚR	59
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	60
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	62
	SEZNAM OBRÁZKŮ	63
	SEZNAM TABULEK.....	65

ÚVOD

Pro firmu vyrábějící plastové obaly je plastový granulát jedna z největších položek, co se týká nákladů. Zisk firmy je poté závislý na ceně a nakládání s tímto materiálem. V posledních letech je, čím dal tím větší tlak, vyvíjený společnostmi na tyto firmy. Na povrch vystávají pojmy jako cirkulární ekonomika, recyklace a udržitelnost. Využití recyklátu (regranulátu) je jedna z hlavních částí pojmu udržitelnost.

Na základě aktuálnosti tématu využití recyklátu ve výrobě jsem zvolil toto téma jako předmět mé bakalářské práce. Hlavním cílem bakalářské práce je vytvořit cenově přijatelný návrh na zlepšení a zautomatizování procesu zpracování regranulátu.

Práce se skládá z teoretické a praktické části, kdy celá práce je členěna do 6 kapitol a z toho 3 kapitoly tvoří praktickou část a 3 teoretickou část. V úvodu práce je popsána linka, kde dochází k plýtvání materiálem. Podrobněji jsou popsány části, které jsou přímo součástí dávkovacího zařízení, a je popsán současný stav řízení dávkování regranulátu. Ve druhé kapitole se práce zabývá způsoby spojitého měření výšky hladiny. Obsahem třetí kapitoly je automatizace, konkrétně druhy regulátoru, které jsou běžně používány pro řízení procesů ve výrobě.

Praktická část začíná čtvrtou kapitolou, ve které je vytvořen matematický model sila pro uchování regranulátu. Pátá kapitola popisuje vytvořený algoritmus řízení a ověřuje jeho funkčnost na matematické modelu. Obsahem poslední kapitoly je zhodnocení návrhu a doporučení pro realizaci projektu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

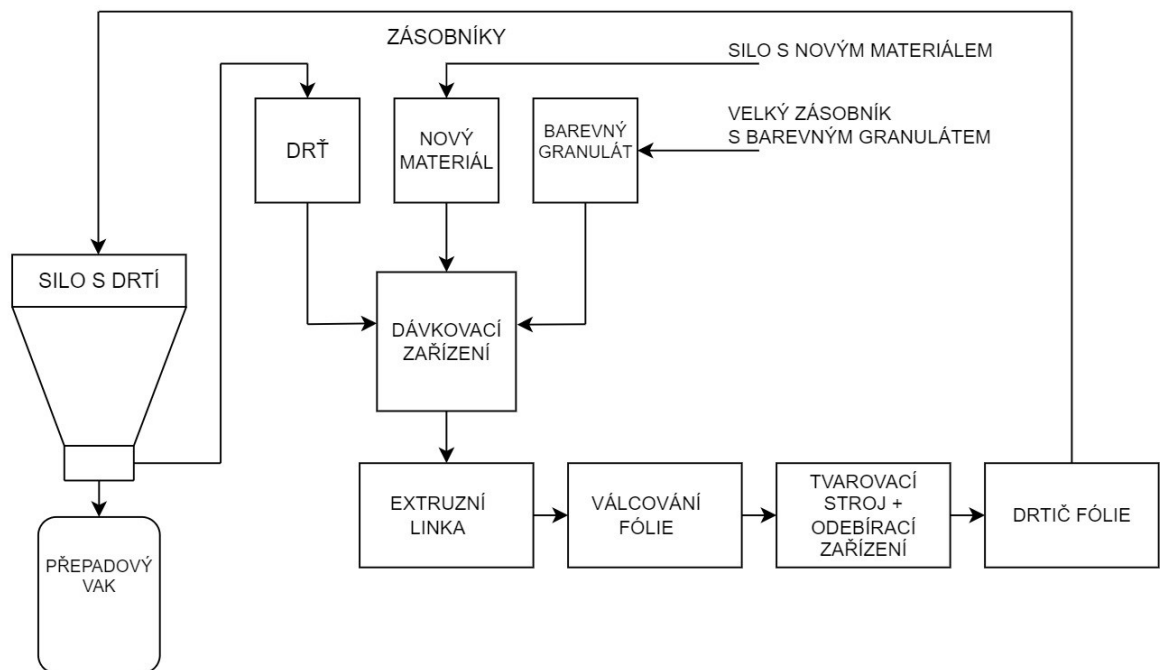
1 POPIS VÝROBNÍ LINKY INLINE 21

Předmětem této bakalářské práce je zvýšení míry automatizace výrobní linky inline 21 znázorněné na obr. 1. Tato linka se používá pro výrobu plastových obalů. Především plastových kelímků pro potravinářský průmysl.



Obr. 1 Pohled na výrobní linku inline 21

Schéma výrobní linky je znázorněno na obr. 2. Materiál vstupuje ze sila či velkých zásobníků do malých zásobníků, které jsou součástí dávkovacího zařízení (obr. 3). Z tohoto zařízení má vycházet již poměrově ideální směs materiálu do vytlačovací linky. Do dávkovacího zařízení většinou vstupují 3 základní složky, a to nový transparentní materiál, barevný granulát a regranulát (drť). Tavenina vystupující z vytlačovací hlavy prochází přes tříválcový kalandr (obr. 4), ze kterého vystupuje fólie o požadované šířce a tloušťce.



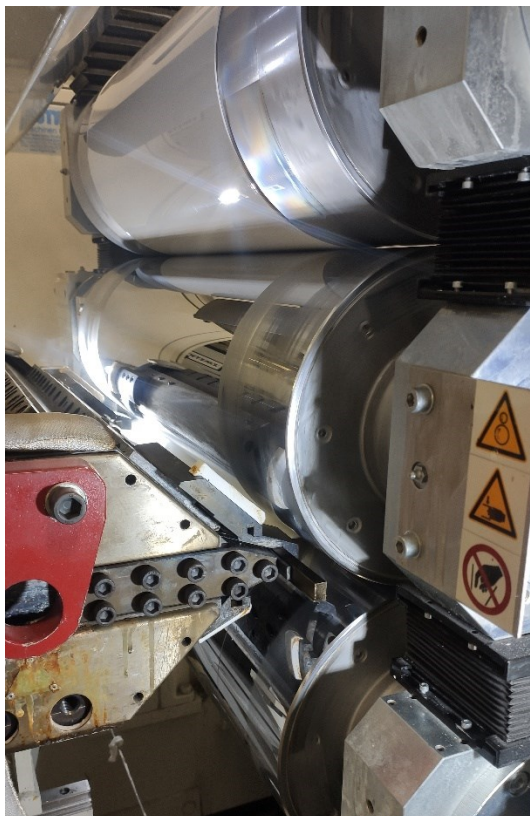
Obr. 2 Blokové schéma linky inline 21



Obr. 3 Systém dávkování materiálů

Následně se tato fólie pomocí řetězového vedení přivede do tvarovacího stroje, kde se vysekne a vytvaruje hotový polotovár. Odebírací zařízení je v podstatě samostatný automatizovaný stroj, který odebírá z tvarovacího stroje polotovary a následně je přepravuje až do

kartónové krabice. Zbytková prostřižená fólie je přepravována nad odebíracím zařízením do drtiče fólie. V drtiči je fólie rozdrčená na jemné třísky (regranulát) a následně je potrubím pomocí lopatkové vývěvy transportována do sila-zásobníku regranulátu.

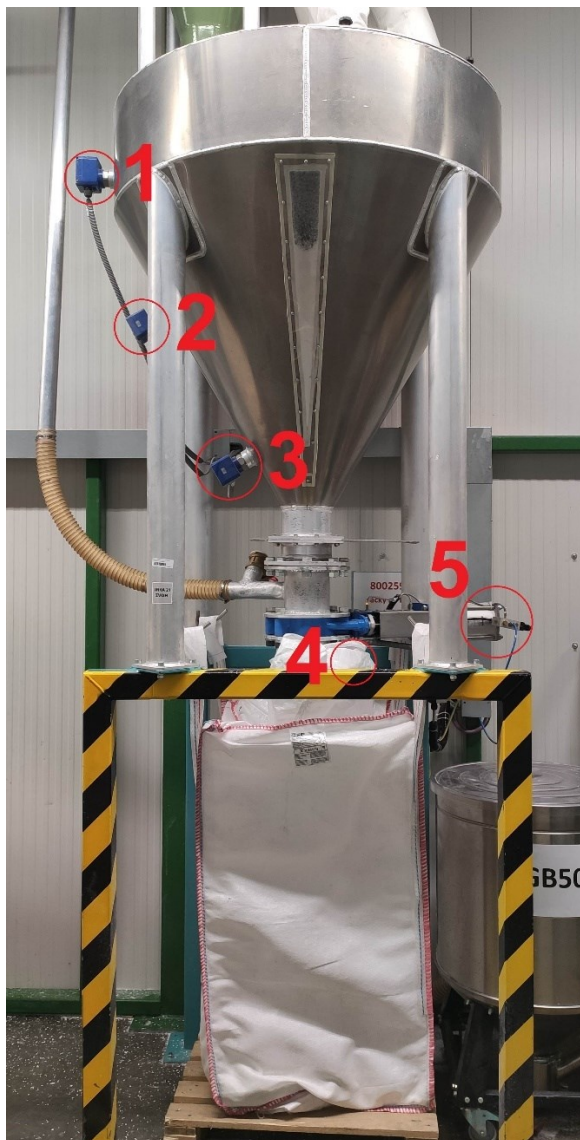


Obr. 4 Tříválcový kalandr

1.1 Silo pro uchování regranulátu

Regranulát vstupuje do sila z vrchní části. Ve spodní části sila je regranulát pomocí podtlakového zařízení odsáván do dříve popsaného malého zásobníku, který je součástí dávkovacího zařízení. Silo je opatřené čtyřmi senzory pro sledování výšky hladiny. Každý senzor indikuje určitý stav výšky hladiny.

- Senzor č. 1 - maximální výška hladiny
- Senzor č. 2 - minimální výška hladiny
- Senzor č. 3 - silo je prázdné
- Senzor č. 4 - přepadový vak je plný



Obr. 5 Silo s regranulátem a rozmístění čidel výšky hladiny

Číslem 5 je označený ventil, který je řízený signálem ze senzoru č. 1. Pokud je výška hladiny na maximální úrovni dojde k sepnutí ventilu a otevření přepadového otvoru. Otevření přepadového otvoru je nastaveno na 3 sekundy od sepnutí senzoru č.1. Regranulát tedy padá do přepadového vaku. Tímto způsobem se výška hladiny dostane zpět pod maximální úroveň. Senzor č. 2 je ve stávajícím zařízení sice plně funkční ale se signálem, který je výstupem tohoto čidla, se již npracuje a není k němu vztaženo žádné řízení. Senzor č. 3 hlásí prázdný stav sila. Toto hlášení se projeví blikáním oranžového světla na majáku, který je umístěný v blízkosti dávkovacího zařízení. Senzor č. 4 je umístěn v nejnižší části sila, a to v hrdle přepadového otvoru. Pokud je silo i přepadový vak plný, musí dojít k okamžité výměně přepadového vaku. Při pozdní výměně vaku hrozí ucpání celé soustavy potrubí.

1.2 Malý zásobník s regranulátem

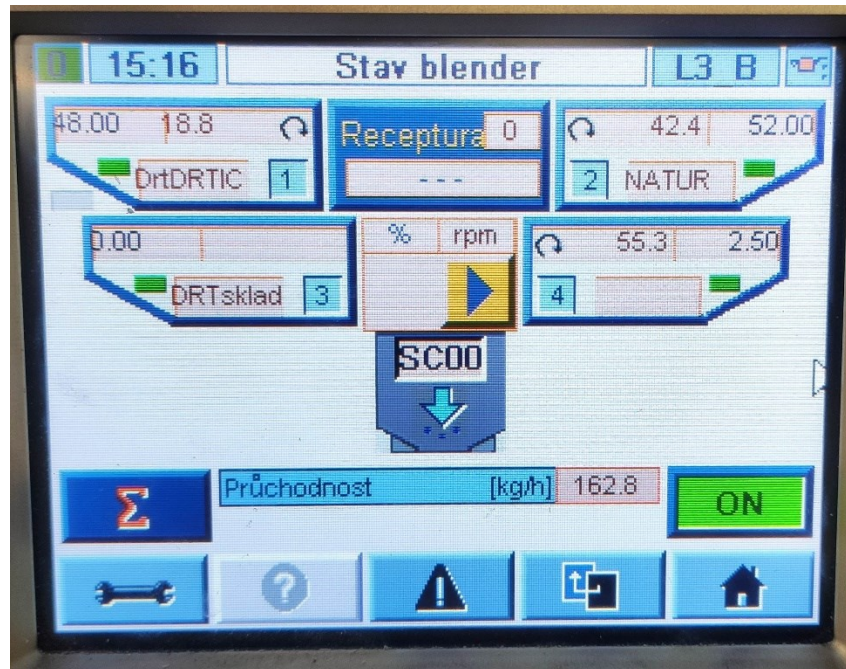
V zásobníku se akumuluje regranulát pro dávkovací zařízení. Pokud hladina v zásobníku klesne, klapka se překlápí a senzor 2 vyšle signál. Tento signál aktivuje podtlakové zařízení, které způsobí nasávání regranulátu ze sila. Celý proces nasávání trvá do doby, nežli hladina regranulátu dosáhne úrovně senzoru 1.



Obr. 6 Malý zásobník s regranulátem

1.3 Dávkovací zařízení

Hlavním úkolem dávkovacího zařízení je zajišťovat trvalé zásobování vytlačovací linky materiálem, a to ve správném poměru. Jednotlivé složky materiálu jsou dávkovány pomocí šnekových dopravníků viz. obr. 8. Poměr jednotlivých složek materiálu se manuálně zadává prostřednictvím dotykového panelu, který je zobrazen na obr. 7.



Obr. 7 Panel dávkovacího zařízení

Dávkovací zařízení obsahuje 4 vstupy. Regranulát (1), nový materiál (2), barevný granulát (4) a na pozici číslo 3 je vstup, kde se zpracovává regranulát z přepadového vaku. Zásoba materiálu pro vstup číslo 3 je realizována pomocí nerezové nádoby do které se vysypává obsah přepadového vaku. Tento vstup není momentálně z technologických důvodů využíván, protože při současném způsobu řízení dávkování pouze prohlubuje nedostatky tohoto řízení.



Obr. 8 Dávkovací zařízení

1.4 Nedostatky manuálního řízení poměru dávkování

Cílem společnosti je zpracovávat veškerý regranulát, který se během výroby akumuluje v síle. Z provozních důvodů je optimální, když se hladina regranulátu udržuje na úrovni cca 30 % objemu síla. Procento zbytkového materiálu se mění dle násobnosti a střížného průměru formy. Převážně se pohybujeme okolo 50 % při zpracování polypropylenu a okolo 70 % při zpracování vícevrstvé EVOH (ethylene vinyl alcohol) fólie. Při bezporuchovém chodu výroby je tento způsob řízení dostačující. Manuálně se tedy nastaví požadované procento regranulátu a při ustáleném stavu výroby se hladina v síle udržuje na konstantní úrovni.

V praxi to vypadá ale zcela jinak. Problém nastává v případě poruchy jednoho ze zařízení linky inline. Velká část poruch připadá na odebírací zařízení. Porucha odebíracího zařízení ukončí cyklus tvarovacího stroje, ale transport fólie do drtiče stále pokračuje. To znamená, že do síla přibývá 100 % regranulátu ale odebíráme např. pouze 50 %. V tomto případě se hladina v síle začíná zvyšovat. Pro zpětné dosažení optimální hladiny zásoby v sílu, se musí manuálně zvýšit podíl složky regranulátu. Volba procenta je limitovaná od 0 až po 100 % podílu složky regranulátu. S tímto úkonem je silně svázaný zásadní problém, systém je totiž v tuto chvíli závislý na člověku, který musí v limitovaném čase ručně zasáhnout a nastavit procenta dávkování na optimální hodnotu. Optimální hodnotou rozumíme nastavit takové procento, aby příchozí regranulát do síla se rovnal odebíranému regranulátu dávkovacím zařízením pro zpětné zpracování. Podmínkou je přijít včas k panelu, a to v okamžiku, kdy je hladina na úrovni okolo 30 % objemu síla. Bohužel tento případ nenastává pravidelně. V praxi je běžné, že seřizovač často pracuje na jiném stroji a dojde k sílu pozdě, a to v době kdy je téměř prázdné. V tuto chvíli navolí nižší procento složky regranulátu za účelem zvýšení hladiny na optimální úroveň. Silo se začíná plnit a celý výše popsany proces se opakuje. Hladina se pohybuje nahoru a dolů v celém rozsahu a k ustálení na optimální úrovni příliš často nedochází.

1.4.1 Vliv podílu složky regranulátu na kvalitu výroby

Pro kontinuální chod výroby je nezbytné provádět pouze malé změny nastavení poměrů. Manuální nastavení podílu regranulátu dovoluje měnit poměr od 0 až po 100 %. To svádí k urychlení děje, kdy se snažíme dostat zpátky z výchozí pozice na optimální hladinu regranulátu v síle. Každý extrémní zásah má ale poté vliv na kvalitu fólie a kvalitu výsledného polotovaru.

1.4.2 Nízké procento složky regranulátu

Jeden z negativních důsledků volby nízkého procenta, za účelem urychlení optimalizace výšky hladiny, je nedostatečné probarvení fólie. Podíl složky barevného granulátu je volen na základě skutečnosti, že regranulát již obsahuje určité procento barvy. Skoková změna podílu, ovlivňuje také regulační děje, které se odehrávají v extruzní lince. Tato náhlá změna poměru materiálů má za následek změnu fyzikálních a chemických vlastností taveniny.

1.4.3 Vysoké procento složky regranulátu

Vysoké procento složky regranulátu negativně ovlivňuje výsledný polotovar. Regulační děje v extruzní lince jsou zde ovlivněny taktéž. Z praxe je viditelná změna viskozity taveniny vystupující z extruzní linky. Další nežádoucí důsledek je zhoršení vlastností výsledného polotovaru. Jeden z nejvýznamnějších problémů, je snížení houževnatosti, což se projevuje křehkostí produktu, konkrétně praskáním polotovaru při deformaci.

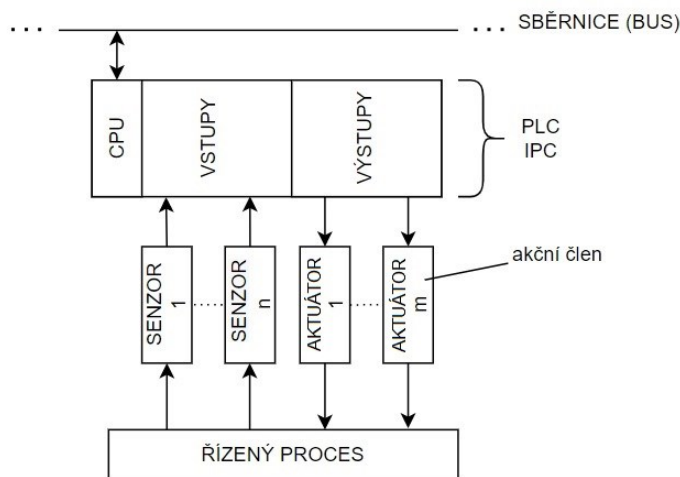
1.5 Cíle bakalářské práce

Primárním cílem této bakalářské práce je návrh odstranění nutnosti obsluhy (seřizovače) zasahovat manuálně do systému dávkování regranulátu a omezit extrémní zásahy ovlivňující výslednou kvalitu polotovaru.

Jeden z ekonomicky nejvíce přijatelných způsobů, jak tohoto cíle dosáhnout, je přidání měřicího zařízení výšky hladiny do sila pro uložení regranulátu. Současně je nezbytné zachovat stávající řízení pomocí PLC systému a rozšířit ho o nastavení podílu složky regranulátu na základě výšky hladiny. Z technologických důvodů je potřeba vybrat vhodný snímač hladiny a navrhnout regulační algoritmus, který bude respektovat požadavky na kontinuální chod výroby. Tohoto cíle lze dosáhnout správným nastavením regulačního algoritmu, což je hlavní náplní této práce.

2 SENZORY V PRŮMYSLOVÉ VÝROBĚ

Průmyslová výroba se již v dnešní době neobejde bez sensorů. Sensor hraje velkou roli v řízení a automatizaci procesů, udává nám informaci o aktuálním stavu řízené veličiny a ve zpětné vazbě je tato informace porovnávána s požadovanou hodnotou. V dnešní době jsou senzory čím dál tím více sofistikované a dokážeme snímat velké množství fyzikálních, chemických nebo i biologických veličin. Výstup ze senzoru je nejčastěji v podobě elektrického signálu například ve formě velikosti napětí, proudu či kapacity. Převod ze snímané hodnoty na signál se může lišit dle účelů použití daného senzoru. Převážně se pracuje s binárním nebo spojitým (analogovým) signálem, který je v případě počítačové řízení převáděn na signál digitální. [1] Zvláštní skupinu tvoří inteligentní senzory. Do této skupiny patří senzory, které mají v sobě implementované funkce pro předzpracování měřených dat a možnost jejich transportu do řídicí jednotky. Takový senzor poté umí např. filtrovat, linearizovat a normalizovat měřený signál. Dále je schopný např. potlačit šum, detekovat a samostatně eliminovat hodnoty, které jsou chybné. Přidáním vhodných algoritmů se dokáže tento senzor sám překalibrovat, a tím reagovat na změnu vnějších rušivých vlivů.[2]



Obr. 9 Umístění senzorů v automatizačním zařízení [1]

2.1 Měření výšky hladiny sypkých materiálů

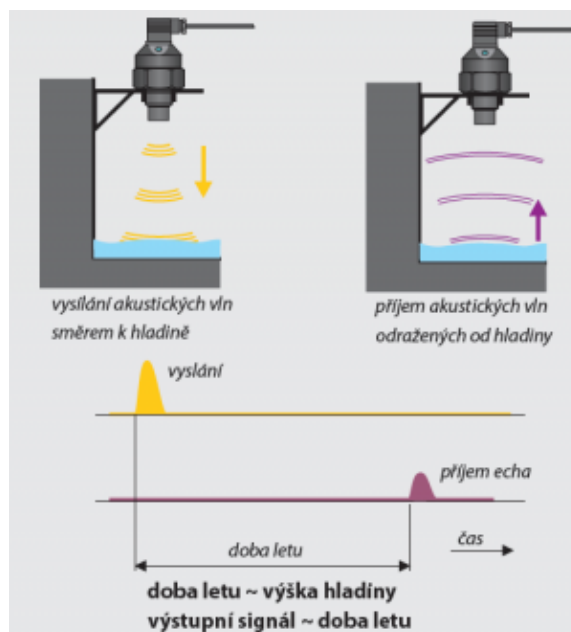
Pro přesné a plynulé dávkování materiálů a s tím spojené řízení výšky hladiny v síle je potřeba vybrat vhodný typ hladinoměru. Dvoupolohové řízení by sice bylo dostačující, ale nespĺňovalo by konkrétní požadavky pro stabilizaci celého procesu výroby. Vzhledem k výše zmiňovaným okolnostem je potřeba znát výšku hladiny v každém okamžiku. Z těchto

důvodu jsou níže popsány hladinoměry, které pracují spojitě. Pro spojité měření výšky hladiny sypkých materiálů se nejvíce používají tyto hladinoměry:

- Ultrazvukové
- Kapacitní
- Radarové (mikrovlnné)
- Laserové
- Radioizotopové

2.1.1 Ultrazvukové hladinoměry

Princip, na kterém pracuje ultrazvukový hladinoměr je založený na měření rychlosti zvuku, jak je znázorněno na obr.10. Senzor obsahuje generátor ultrazvukových vln, ten vyšle za sebou několik pulsů, které se odrazí od hladiny v nádrži. Celkový čas od vyslání akustické vlny až po příjem odražené části vlny nám po přepočtu udává vzdálenost. Pokud senzor používá pouze jediný měnič, na vyslání a příjem vlny, musí se počítat s jistým omezením. Mluvíme tady o takzvané mrtvé zóně. Vysílač poté co vyšle signál, musí takzvaně dokmitat a až poté může přijímat odražený signál. Pokud má senzor dosah např. 6 metrů jedná se o slepé místo v rozsahu až 80 cm od senzoru. Tento problém lze minimalizovat, pokud má senzor oddělené systémy na vysílání a přijímání signálů. [1]

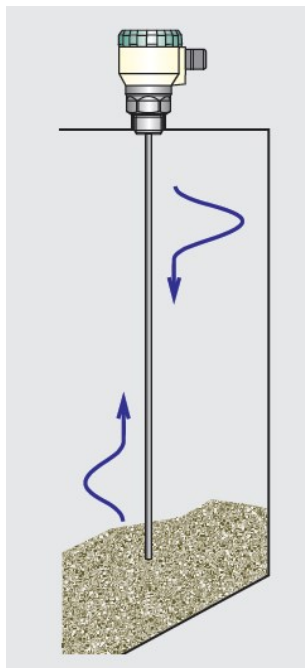


Obr. 10 Princip ultrazvukového hladinoměru [3]

Největší výhodou tohoto způsobu měření je jeho bezkontaktní způsob měření. Senzor nemusí být v přímém kontaktu s měřenou hladinou a nemůže být přímo ovlivněn měřeným médiem. Jeho nevýhodou spočívá v citlivosti na změnu teploty, vlhkosti, tlaku a proudění vzduchu.

2.1.2 Radarové (mikrovlnné) hladinoměry

Radarový hladinoměr se vyrábí v provedení kontaktním a bezkontaktním. Pro kontaktním měření hovoříme o tzv. radarovém hladinoměru s vedenou vlnou. Princip je stejný jako u ultrazvukového měření. Údaj o výšce hladiny je rozdíl mezi vysláním a přijetím signálu za určitý čas. Hlavním rozdílem mezi radarovým přístrojem a ultrazvukovým přístrojem je typ použité vlny: rádiové vlny místo zvukových vln. Bezkontaktní radarová zařízení trpí mnohem větší ztrátou signálu než radarová zařízení s řízenou vlnou, kvůli přirozené tendenci elektromagnetického záření rozptylovat se prostorem. Kontaktní způsob bojuje proti této ztrátě signálu směřováním tohoto signálu po přímé dráze pomocí vodivé tyče. [4]

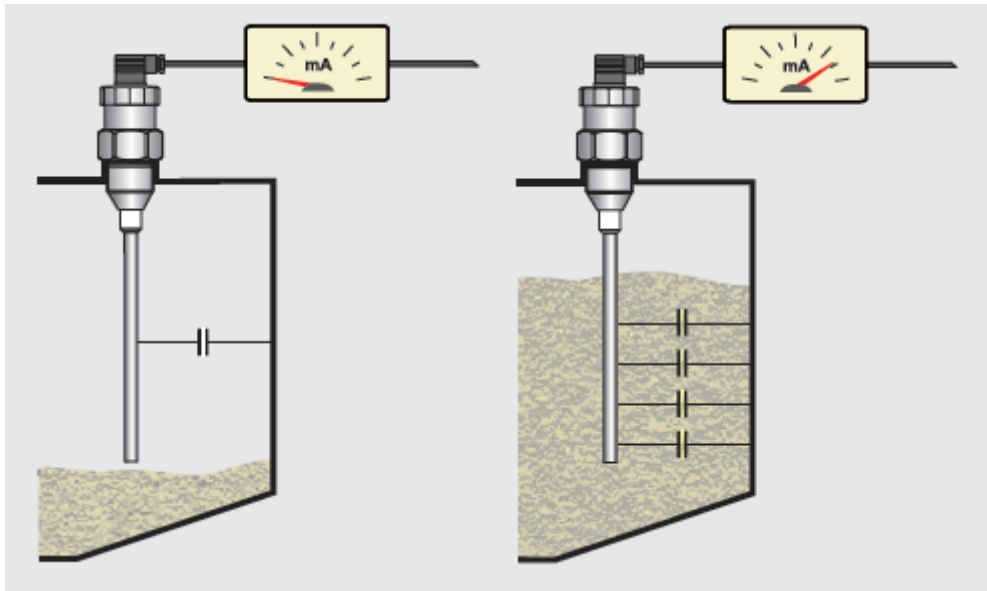


Obr. 11 Princip radarového hladinoměru s vedenou vlnou [3]

2.1.3 Kapacitní hladinoměr

Kapacitní hladinoměr se skládá z kondenzátoru a elektrody, která je ponořena v měřené látce. Čím více je elektroda obklopena měřenou látkou, tím se úměrně mění kapacita kondenzátoru (obr. 12). Výsledná hodnota kapacity je poté převedena na výšku hladiny.

Elektrody kapacitních hladinoměrů mají většinou tvar tyče nebo se můžou použít i kovová lana se závažím. Pro měření nevodivých materiálů se využívá jako druhá elektroda přímo nádoba, ve které je měřená látka. Podmínkou je ale nutnost, aby alespoň jedna vrstva nádoby byla elektricky vodivá. [5]

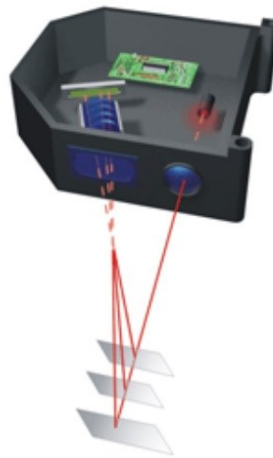


Obr. 12 Princip kapacitního hladinoměru [3]

Nejvýhodnější použití kapacitního snímače je pro stav, kdy je velký rozdíl mezi permitivitou prostředí a permitivitou měřeného média. Snímač s velkou citlivostí je nutné použít v případech kdy je tento rozdíl permitivit menší než 1. Velkou výhodou tohoto způsobu měření je spolehlivost provozu. Zejména tolerance nánosů tvořící např. prachové částice, které ulpívají na tyčové elektrodě.

2.1.4 Laserové hladinoměry

Laserové hladinoměry fungují na stejném principu jako ultrazvukové hladinoměry. Zásadní rozdíl je vysílaný signál. Laserový hladinoměr využívá k detekci vzdálenosti odraz světla. První způsob měření spočívá v tom, že vysílač vyšle sled laserových paprsků a na základě rychlosti odrazu od hladiny vypočítá vzdálenost. Druhý způsob funguje na triangulačním principu, tento způsob nevyhodnocuje čas letu odraženého paprsku ale úhel odrazu. Světelný paprsek vytváří na měřené hladině světelný bod, od tohoto bodu se paprsek odrazí pod určitým úhlem zpět k přijímači paprsku. Tento úhel je poté po přepočtu údaj o vzdálenosti senzoru a měřeného objektu. [6]

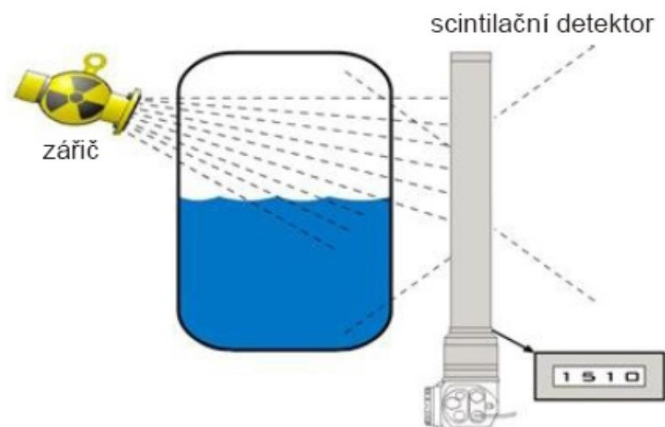


Obr. 13 Triangulační princip laserového měření [11]

Jednou z výhod tohoto způsobu měření je, že nereaguje na změny tlaku nebo teploty vzduchu. Měření pomocí laseru je velmi přesné a netečné vůči výparům z měřeného objektu.

2.1.5 Radioizotopové hladinoměry

Princip tohoto způsobu měření je založený na skutečnosti, že intenzita radioaktivního záření úměrně klesá s tloušťkou materiálu, kterým prochází. Nejčastější použití těchto přístrojů je v prostředích, kde dochází k extrémním podmínkám jako jsou např. vysoké teploty nebo tlaky. Radioaktivní zářič je tvořen zdrojem gama záření. Toto záření měřeným médiem pronikne ale nemá schopnost vyvolat jeho radioaktivitu. Detekce probíhá pomocí scintilační detektoru, který ve zkratce převádí ionizující záření na světelné paprsky. Tyto světelné paprsky jsou poté převedeny na elektrický signál.



Obr. 14 Princip Radioizotopového hladinoměru [6]

Tento způsob měření se řadí k bezkontaktním způsobům měření. Je imunní vůči změně chemického složení měřeného média. Nevýhodou je nutná ochrana proti radioaktivnímu záření, a s tím spojená nutnost zabezpečit prostor měření, aby nedošlo k újmě na zdraví. Oproti tomu je velkou výhodou spolehlivost tohoto měření. [6]

2.2 Vybraný typ hladinoměru

Pro spojitě měření regranulátu v silo byl vybrán hladinoměr, který pracuje na principu ultrazvuku. Ve prospěch tohoto způsobu měření hovoří zejména jeho bezkontaktní způsob měření. Další výhodou je nezávislost na elektrické vodivosti a také jeho kompaktní provedení.

Nevýhody ostatních způsobu měření pro náš případ:

Radioizotopový – nutnost ochrany obsluhy před radioaktivním zářením

Laserový – při zaprášení senzoru dochází k nepřesnosti měření

Kapacitní – nevhodnost použití kontaktního měření (umístění senzoru v odnímatelném víku)

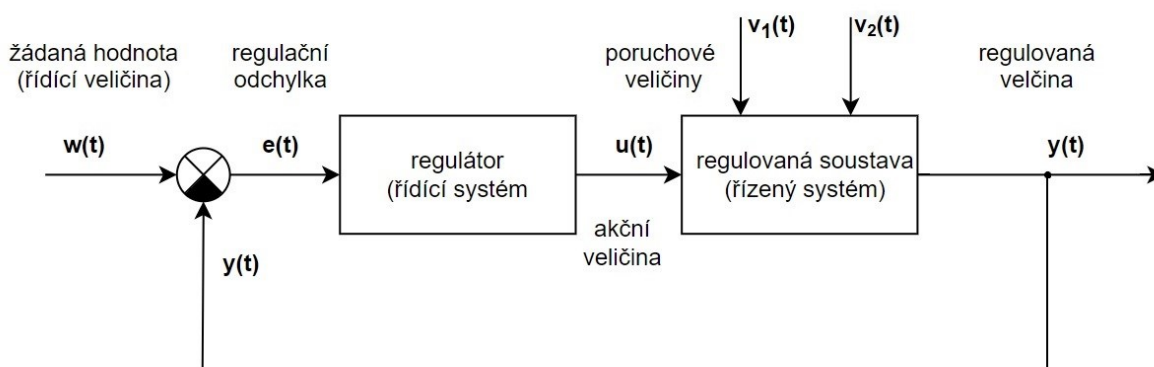
Radarový – pro sypké materiály nutnost použití tyčové sondy

3 AUTOMATIZACE

Jedním z hlavních důvodů, proč zavádíme automatizaci do výrobních procesů, je náhrada a usnadnění lidské práce. Pokud se jedná o dlouhodobou monotónní práci, tak vzniká riziko chyby. Tyto chybové faktory se snažíme automatizací procesů odstranit. Důležitou součástí automatizace je řízení, či regulace spojitých fyzikálních veličin, tak aby se chovaly podle našich představ. Regulace je řízení se zpětnou vazbou, kdy dostáváme skutečnou informaci o řízeném objektu, která je porovnávána s požadovanou hodnotou. Mezi vyšší formy řízení patří adaptivní, optimální, učící se systémy a metody využívající metod umělé inteligence.

3.1 Regulační obvod

Regulace je v podstatě řízení nějaké technologické veličiny, například výšky hladiny, a snaha o udržení této veličiny na požadované úrovni. Pokud by do systému nevstupovaly poruchové veličiny, vystačily bychom pouze s ovládáním. Základní blokové schéma, kterým lze popsat regulační obvod je znázorněn na obr. 15.



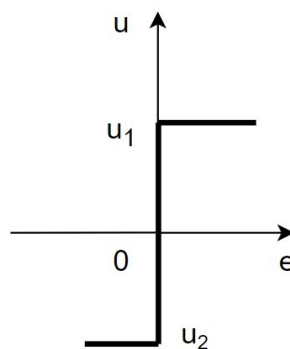
Obr. 15 Blokové schéma regulačního obvodu [7]

Znázorněné schéma je značně zjednodušené ale pro vysvětlení principu funkce dostačující. Pod pojmem regulovaná soustava, si můžeme představit nádrž v níž je třeba udržovat požadovanou výšku hladiny a všechny technické prostředky, kterými můžeme tento stav měnit. Regulátor provádí takové akční zásahy do regulované soustavy, aby skutečná (měřená) veličina $y(t)$ byla stejná jako požadovaná hodnota $w(t)$. Je-li hodnota regulované veličiny odlišná, v porovnávacím členu dojde k vyhodnocení, a následné vygenerování regulační odchylky $e(t)$. Regulátor na základě této regulační odchylky vygeneruje akční veličinu $u(t)$,

kteřá již přímo působí na regulovanou soustavu. To znamená, že pokud se hladina z neznámých důvodů zvýší, regulátor tuto změnu zaznamená a vyšle signál např. do ventilu, který se více pootevře a odpustí vodu z nádrže.

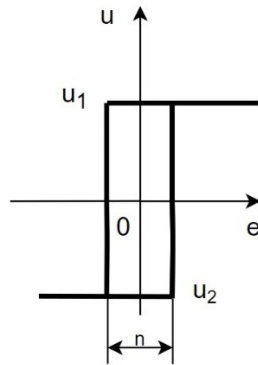
3.2 Dvoupolohová a třípolohová regulace

Dvoupolohová regulace má pouze dva stavy, většina těchto regulátorů pracuje na principu ON-OFF řízení. Příkladem může být funkce termostatu. Pokud je požadovaná teplota překročena tak se topení vypne, pokud je skutečná teplota nižší než požadovaná, topení se zapne. Nevýhodou tohoto způsobu regulace je, že nikdy nedojde k ustálení regulační odchylky a průběh regulované veličiny má vždy kmitavý charakter.



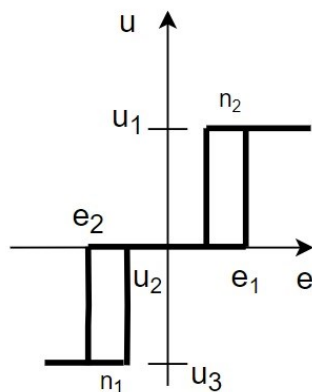
Obr. 16 Přepínací charakteristika dvoupolohového regulátoru [8]

Znázorněná charakteristika na obr. 16 může být připodobněna k funkci termostatu. Akční veličina u_1 by znázorňovala stav vypnuto a akční veličina u_2 stav zapnuto. Pásmo necitlivosti (n) neboli hystereze se zavádí z důvodu zmenšení frekvence spínání. Pokud je regulační odchylka v tomto pásmu, nedochází k přepnutí do druhého stavu. Bez pásma necitlivosti by regulátor přepínal svoje dva stavy velmi rychle a docházelo by tak k velkému zkrácení životnosti regulátoru. Dvoupolohové regulátory se běžně používají pro regulaci teploty nebo regulaci výšky hladiny. [8]



Obr. 17 Charakteristika dvoupolohového regulátoru s hysterezí [8]

Třípolohová regulace nabývá třech stavů a dává nám tedy větší možnosti seřizování regulátoru. Pokud nastavíme regulátor vhodným způsobem, můžeme výrazně zkvalitnit regulační děj. Tohoto cíle lze dosáhnout například nastavením střední hodnoty u_2 na 50% hodnoty u_1 .

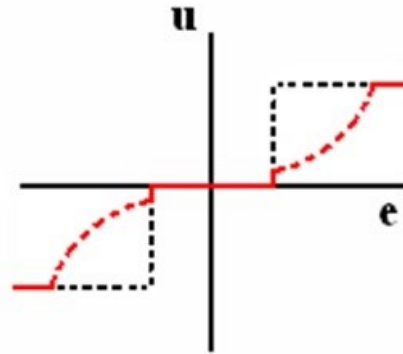


Obr. 18 Charakteristika třípolohového regulátoru s hysterezí [8]

Jednou z velkých nevýhod dvoupolohové či třípolohové regulace je, že akční zásah se provede až ve chvíli, kdy regulační odchylka dosáhne polohy u_1 nebo u_2 . Z tohoto důvodu může docházet k velkým překmitům.

3.2.1 Třípolohový regulátor s penalizací akční veličiny

Na obr. 19 je znázorněná charakteristika regulátoru s penalizací akční veličiny a hysterezí.



Obr. 19 Třípolohový regulátor s penalizací akční veličiny a hysterezí [12]

Na základě regulační odchylky narůstá či klesá akční zásah z nulové hodnoty až do jedné z mezních hodnot polohového regulátoru. Výhodou tohoto způsobu řízení je snížení kmitání soustavy. Akční veličina totiž narůstá plynule, a tudíž nedochází ke skokovým změnám akční veličiny.

Průběh, jakým se pohybuje přechod z jednoho stavu do druhého ovlivňuje penalizační konstanta k_p . [12]

Výpočet penalizační konstanty:

$$k_p = 1 + \left(1 - \frac{w - y}{w} \cdot \frac{1}{\delta}\right) (k_{pmax} - 1)$$

kde:

w-žádaná hodnota

y-skutečná hodnota

δ -procento působnosti k_p

k_{pmax} -maximální hodnota zesílení v rozsahu δ

3.3 PID regulátory

Hlavní úkolem regulátoru je tedy reagovat na regulační odchylku $e(t)$ a generovat takový akční zásah, který se bude snažit tento stav změnit a působit vždy s cílem dosáhnout nulové regulační odchylky. Základní rozdělení klasických spojitých regulátoru se odvíjí podle toho, jak pracuje s regulační odchylkou. Regulační odchylku můžeme zesilovat, integrovat nebo derivovat. V praxi se používá nejčastěji kombinace všech tří složek nebo kombinace dvou složek. Regulátor, který obsahuje všechny 3 složky se nazývá **PID** regulátor. [9]

- **P – proporcionální**
- **I – integrační**
- **D – derivační**

Složka P, a složka I může být použita samostatně, jelikož je derivace konstanty 0, musí být složka D použita pouze v kombinaci s jinou složkou. Nejčastěji se setkáváme s kombinací regulátoru PD, PI a PID.

3.3.1 Proporcionální složka regulátoru

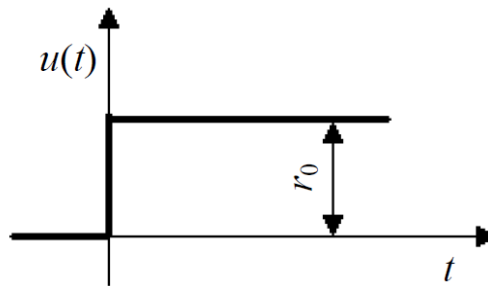
Nejjednodušší případ regulátoru je regulátor typu P (proporcionální), je to v podstatě zesilovač. Z rovnice je patrné, že výstup z regulátoru typu P, je pouze násobení regulační odchylky konstantou r_0 .

$$u(t) = r_0 e(t)$$

$u(t)$ -akční veličina

r_0 -konstanta zesílení

$e(t)$ -regulační odchylka



Obr. 20 Přechodová charakteristika regulátoru typu P [7]

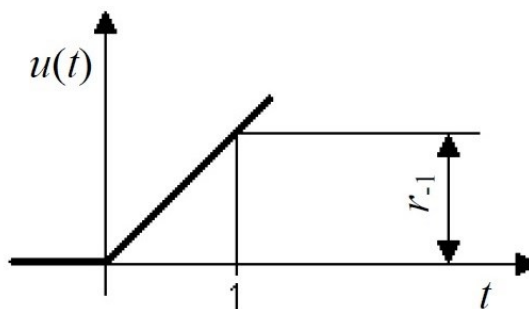
Nevýhodou tohoto typu regulátoru je při regulaci proporcionální soustavy zanechání trvalé regulační odchylky. Při volbě velikosti konstanty r_0 je třeba hledat určitý kompromis. Zvolíme-li velké zesílení, regulační děj bude sice rychlý ale zároveň také velmi kmitavý. Může dojít k velkým zesilujícím rozkmitům, které budou vést až k nestabilitě celého systému. Malé zesílení vede sice ke stabilitě, ale zmenšuje se citlivost (reakce) systému a zvětšuje se regulační odchylka.

3.3.2 Integrovní složka regulátoru

Jak již název napovídá, tak I-regulátor v sobě obsahuje integrál. Výstupem z regulátoru, který obsahuje pouze integrovní složku je akční veličina přes konstantu úměrná integrálu regulační odchylky.

$$u(t) = r_{-1} \int e(t) dt$$

r_{-1} – integrovní konstanta



Obr. 21 Přechodová charakteristika regulátoru typu I [7]

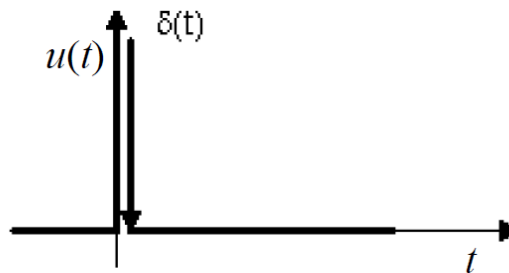
Při použití integrovní složky můžeme proces ustálit a regulační odchylku dostat na nulovou hodnotu. To znamená, že se regulační odchylka může úplně odstranit.

3.3.3 Derivační složka regulátoru

Hlavní využití derivační složky, je urychlení regulačního děje. Výstupní signál je v tomto případě úměrný rychlosti změny signálu vstupního. Jak již bylo zmíněno výše, derivační složka nelze použít samostatně, neboť derivace konstanty je nula.

$$u(t) = r_1 \frac{de(t)}{dt} \quad (3.3)$$

r_1 – derivační konstanta



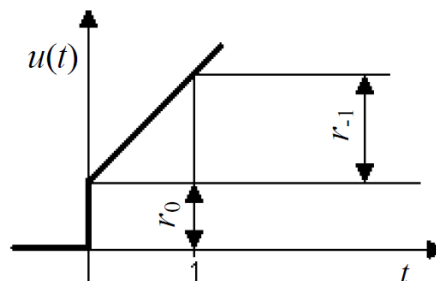
Obr. 22 Přejchodová charakteristika Derivačního členu [7]

Zmenšováním derivační konstanty r_1 způsobíme urychlení děje, tedy rychlost reakce na regulační odchylku. Další významný přínos derivační složky, je jeho schopnost bránit překmitům.

3.4 PI regulátor

Proporcionálně integrační regulátor spojuje výhody integrační a proporcionální složky. Rychlá odezva proporcionální složky a schopnost regulovat přesně s nulovou regulační odchylkou nám dává více možností při seřizování regulátoru.

$$u(t) = r_0 e(t) + r_{-1} \int e(t) dt$$

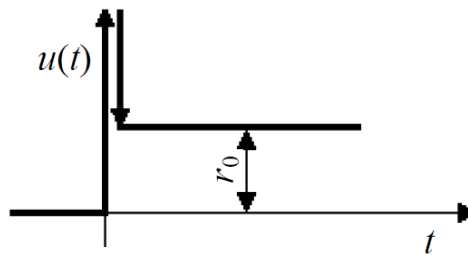


Obr. 23 Přejchodová charakteristika PI regulátoru [7]

3.5 PD regulátor

Proporcionálně derivační regulátor nám výrazně zlepšuje stabilitu regulačního obvodu. Regulační pochod začíná větším vlivem derivační složky a postupem času přichází na řadu vliv složky proporcionální. Tento typ regulátoru není již příliš využíván.

$$u(t) = r_0 e(t) + r_1 \frac{de(t)}{dt}$$

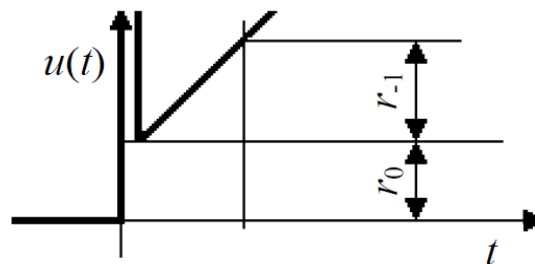


Obr. 24 Přejchodová charakteristika PD regulátoru [7]

3.6 PID regulátor

PID regulátor kombinuje prvky všech tří výše zmíněných členů. Uplatnění nachází zejména pro náročné aplikace, kde je potřeba regulovat rychlé děje.

$$u(t) = r_0 e(t) + r_{-1} \int e(t) dt + r_1 \frac{de(t)}{dt}$$



Obr. 25 Přejchodová charakteristika PID regulátoru [7]

Nastavení parametrů PID regulátoru je poměrně složitý proces. V praxi se mnohdy nastavují parametry empiricky ale za předpokladu, že nastavení provádí zkušený odborník. Základní předpoklad pro správné nastavení jakéhokoliv regulátoru je dobrá znalost dynamických vlastností celého systému.

3.7 Programovatelný logický automat (PLC)

PLC je zkratka odvozená z anglického názvu „Programmable Logic Controller“. PLC je počítač speciálně navržený pro spolehlivý provoz v náročných průmyslových prostředích – jako jsou extrémní teploty, vlhké, suché nebo prašné podmínky. PLC se používají převážně k automatizaci průmyslových procesů, jako jsou např. různé montážní linky nebo linky na zpracování plastů. V dnešní době můžeme vidět tyto systémy ve všech možných odvětvích. Rozdíl mezi PLC a osobním počítačem je, že PLC může provádět diskrétní a nepřetržité funkce, které PC nemůže dělat, a PLC se mnohem lépe hodí do drsných průmyslových prostředí. PLC lze považovat za odolný počítač, který řídí elektromechanické procesy průmyslového prostředí.

Důležitý aspekt, je schopnost reagovat okamžitě na důležité prvky řízení. U domácího počítače nám nevadí, když na některou operaci vykonávanou procesorem, čekáme delší dobu. Delší dobou myslíme několik milisekund nebo i sekund. Naopak PLC si nemůže dovolit čekat na zpracování signálu z nějakého snímače, a musí ho umět zpracovat v co nejrychlejším možném čase. PID regulátory byli dříve realizovány pomocí fyzických logických obvodů. V dnešní moderní době výpočetní techniky je již celý tento proces implementován převážně v PLC. [5]

3.8 Použitý způsob regulace

V praxi se běžně pro řízení výšky hladiny v nádrži využívají dvou či vícepolohové regulátory. Výhodou je zejména jejich jednoduchost a pro použití, kde není důležitá vysoká přesnost regulace, postačující. Z tohoto důvodu bude použit tento způsob regulace. Pro účely této práce bude řízení zajištěno algoritmem, který pracuje na principu třípolohového regulátoru s penalizací akční veličiny. Vzhledem k okolnostem se tento způsob jeví jako nejvíce vyhovující.

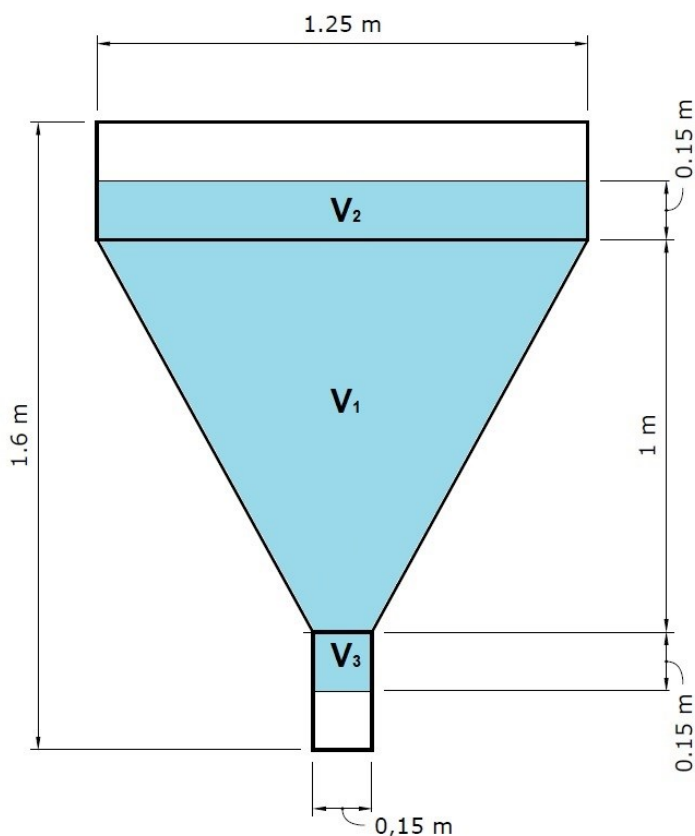
II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 VYTVOŘENÍ MATEMATICKÉHO MODELU SILA

Pro účely ověření navrženého řešení je nejprve nutné vytvořit matematický model, který bude co nejvíce odpovídat reálnému chování systému. Tento model bude poté sloužit pro ověření funkčnosti navrženého algoritmu.

4.1 Výpočet objemu sila

Rozměry sila jsou znázorněny na obr. 26. Minimální úroveň hladiny je 15 cm od spodní části. Na tomto místě je umístěná klapka, která se otevírá pro potřeby odpouštění materiálu při maximální úrovni hladiny v sila. Na horní hranici je již zmiňovaný senzor, který hlásí maximální stav hladiny. Senzor je umístěn ve výšce 15 cm od vrchní části sila.



Obr. 26 Rozměry sila pro uchování regranulátu

Výpočet objemu komolého kužele V_1 :

$$d_1 = 0.15 \text{ m}$$

$$d_2 = 1.25 \text{ m}$$

$$h = 1 \text{ m}$$

$$V_1 = \frac{1}{12} \pi h (d_1^2 + d_1 d_2 + d_2^2) = 0.464 \text{ m}^3 \quad (4.1)$$

Objem horního válce $V_2 = 0.184 \text{ m}^3$

Objem spodního válce $V_3 = 0.01 \text{ m}^3$

Celkový objem sila $V = 0.658 \text{ m}^3$

Objem válce V_3 je zanedbatelný a pro další výpočty se již nebude s tímto objemem počítat. Nulová hladina sila je vztažena ke spodní podstavě komolého kužele. Celkový objem sila po odečtení objemu V_3 je 0.648 m^3 .

4.2 Aproximace vstupních hodnot

Hustota materiálu, která vystupuje z extruzní linky se pohybuje okolo hodnoty 930 kgm^{-3} . Tato hustota je dána směsí polypropylenu a barviva. Informace o hustotě se zadává do panelu extruzní linky a po přepočtu počítač vypíše přesný údaj o tom, kolik hmoty nám při aktuální rychlosti vychází z extruzní linky za jednotku času.

Je možno předpokládat, že hustota výstupního materiálu z extruzní linky je až na malé odchylky konstantní. Opačný případ je u regranulátu. Drtič rozemele fólii na jemné kousky a velikost těchto zrníček poté ovlivňuje objem, který je umístěn do sila. Tento objem je velmi proměnlivý, a ovlivnit ho může jak vyráběná tloušťka fólie, velikost finálního výrobku a také technický stav drtičky. Provedl jsem proto několik testů, kdy byl regranulát vložen do nádoby o předem známém objemu a poté zvážen. Z naměřených výsledků byl odvozen průměr a zaokrouhlen na celé číslo. Pro další výpočty bude tedy regranulát počítán s hustotou $\rho_R = 480 \text{ kgm}^{-3}$

4.2.1 Objemový tok vstupní veličiny

Firma vyrábí velmi mnoho druhů polotovarů o různých tloušťkách, a každý polotovar potřebuje jiný čas pro správné natvarování. Z tohoto důvodu se také mění objemový tok. Pro další výpočty byla vybrána nejpoužívanější tloušťka fólie s průměrnou rychlostí výroby na dané lince.

Tloušťka fólie: 1.3 mm

Šířka fólie: 540 mm

Rychlost stroje: 22 takt/h

Při těchto hodnotách a dané hustotě se na panelu extruzní linky zobrazuje hmotnostní tok 294 kg fólie za hodinu, což odpovídá:

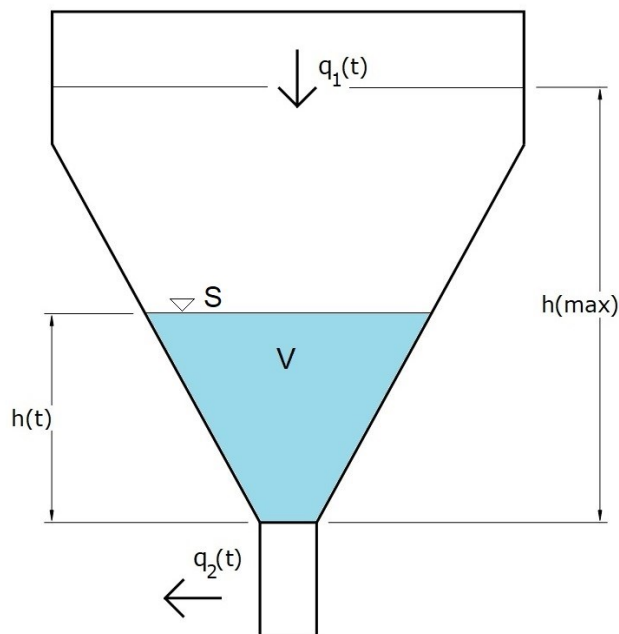
$$V_R = \frac{\dot{m}}{\rho_R} = \frac{294}{480} = 0.6125 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \quad (4.2)$$

Výsledný objemový tok $q_1 = 0.6125 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \cong 0.0102 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$

Při těchto hodnotách se silo při nulovém odběru q_2 zcela naplní za cca 63 minut a 30 sekund. Spočítaný objemový tok je pouze orientační a poslouží pro ověření funkčnosti matematického modelu.

4.3 Matematický popis sila

Řízenou veličinou bude v našem případě výška hladiny $h(t)$. Objemový tok regranulátu vstupující do sila je $q_1(t)$ a objemový tok ze sila je označený $q_2(t)$.



Obr. 27 Model sila regranulátu

V – objem regranulátu [m^3]

S – plocha hladiny [m^2]

$h(\text{max})$ – maximální výška hladiny [m]

Konstantní hladinu udržíme tehdy, pokud se hodnota vstupního toku bude rovnat výstupnímu toku.

$$q_1(t) = q_2(t) \quad (4.3)$$

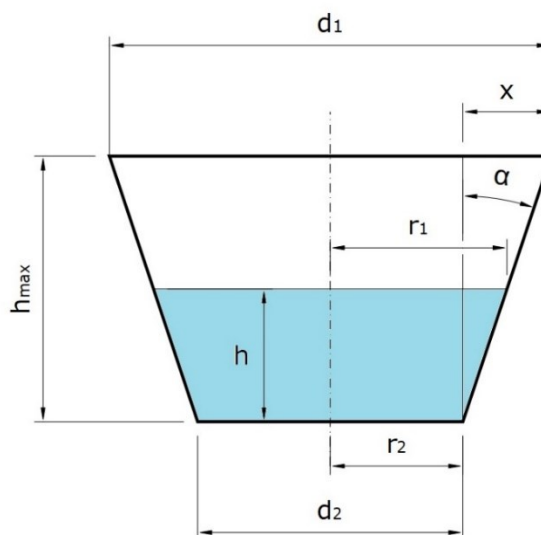
Každá změna přítoku nebo odtoku nám způsobí změnu objemu v síle. Tento vztah můžeme vyjádřit následující rovnicí.

$$\frac{dV(t)}{dt} = q_1(t) - q_2(t) \quad (4.4)$$

Změnu objemu si vyjádříme pomocí změny výšky hladiny, kde S je průřez síla.

$$S \frac{dh(t)}{dt} = q_1(t) - q_2(t) \quad (4.5)$$

Situaci značně komplikuje skutečnost, že velká část síla je ve tvaru komolého kužele. Je nutné proto odvodit vztah, jak se bude měnit plocha S se stoupající hladinou h.



Obr. 28 Výpočet hladiny komolého kužele

Výpočet plochy S je závislý na poloměru r_1 a ten se mění se stoupající hladinou. Odvození je následující:

$$\tan \alpha = \frac{x}{h_{max}} \quad (4.6)$$

$$r_1 = r_2 + h \tan \alpha \quad (4.7)$$

Rovnici (4.6) dosadíme do rovnice (4.1) pro výpočet objemu komolého kužele a získáme tak rovnici objemu, kde jediná neznámá je výška h .

$$V = \frac{1}{3} \pi h (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2) = \frac{1}{3} \pi h ((r_2 + h \tan \alpha)^2 + r_2^2 + r_2 h \tan \alpha + r_2^2) \quad (4.8)$$

Úpravou a roznásobením závorek získáme tento tvar rovnice.

$$V = \pi r_2^2 h + \pi r_2 h^2 \tan \alpha + \frac{\pi}{3} (\tan \alpha)^2 h^3 \quad (4.9)$$

Pomocí derivace získáme tento vztah.

$$\frac{dV}{dt} = \pi r_2^2 \frac{dh}{dt} + 2\pi r_2 (\tan \alpha) h \frac{dh}{dt} + \pi (\tan \alpha)^2 h^2 \frac{dh}{dt} \quad (4.10)$$

Rovnici (4.9) upravíme a vložíme do rovnice (4.4), získáme tak diferenciální rovnici popisující změnu výšky hladiny v síle v závislosti na přítoku a odtoku.

$$(\pi r_2^2 + 2\pi r_2 (\tan \alpha) h(t) + \pi (\tan \alpha)^2 h^2(t)) \frac{dh(t)}{dt} = q_1(t) - q_2(t) \quad (4.11)$$

Výsledný tvar matematického modelu.

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{q_1(t) - q_2(t)}{\pi(r_2^2 + 2r_2 \tan \alpha h(t) + (\tan \alpha)^2 h^2(t))} \quad (4.12)$$

Ve výšce hladiny jednoho metru se tvar sila mění z komolého kužele do tvaru válce. Jelikož je průřez válce ve všech místech stejný, je plocha válce S_1 konstantní. Změna výšky hladiny ve válci je popsána následující diferenciální rovnicí.

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{q_1(t) - q_2(t)}{S_1} \quad (4.13)$$

4.4 Ověření matematického modelu

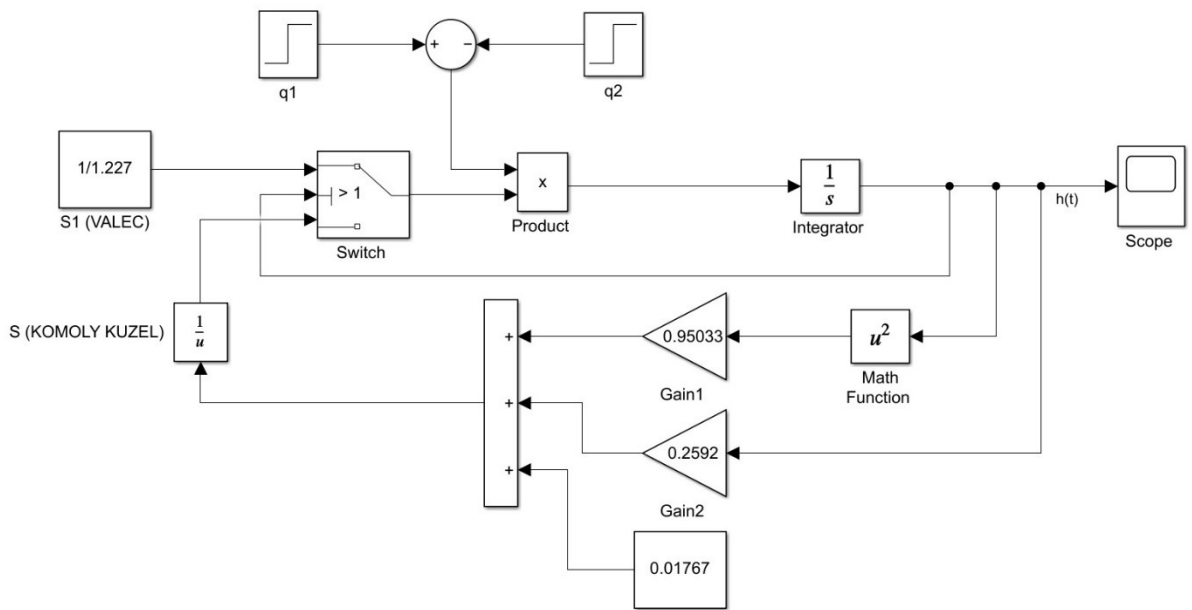
Pomocí programu Matlab v nadstavbovém prostředí Simulink, které je určeno pro simulaci a modelování dynamických systémů, byl vytvořen matematický model sila. Po dosazení konstant do rovnic (4.12) a (4.13) mají rovnice tento tvar.

Pro komolý kužel:

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{q_1(t) - q_2(t)}{0.01767 + 0.2592h(t) + 0.95033h^2(t)} \quad (4.14)$$

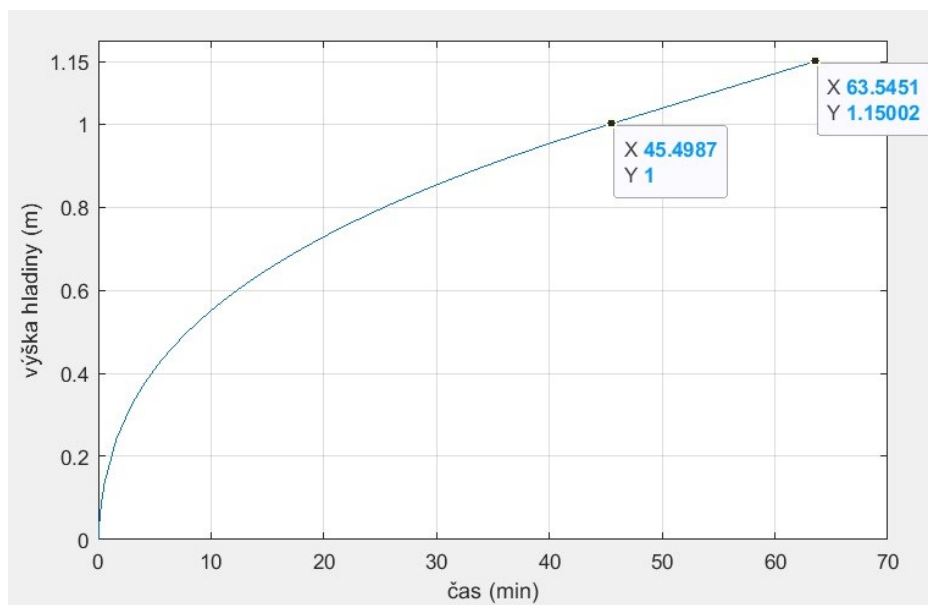
Pro válec:

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{q_1(t) - q_2(t)}{1.227} \quad (4.15)$$



Obr. 29 Schéma matematického modelu síla

Pro ověření správnosti byl na vstup q_1 nastaven objemový tok regranulátu $0.0102 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$. Odběr v podobě proměnné q_2 byl nastaven na hodnotu 0. Při těchto hodnotách by hladina měla dosáhnout úrovně jednoho metru za cca 45.5 minuty a maximální úrovně (1.15 m) za cca 63.53 minuty.



Obr. 30 Průběh plnění síla

Na grafu jsou patrné malé nepřesnosti způsobené zaokrouhlením konstant. Nicméně lze říct, že matematický model téměř odpovídá reálnému vývoji hladiny v síle.

5 REGULAČNÍ ALGORITMUS

Chování regulačního obvodu musí být takové, aby neovlivnil proces výroby. Jak již bylo řečeno, velké zásahy mohou ovlivnit celý proces. Vycházíme ze základního požadavku, zpracovávat, pokud možno veškerý regranulát. Pokud je výroba bez poruch, celý proces je stabilní a nemusí docházet k žádné regulaci poměrů složek nového materiálu a regranulátu.

5.1 Popis poruch vstupujících do regulovaného systému

Výchozí pozice je optimální stav, kdy objemový tok regranulátu vstupujícího do sila, je roven objemovému toku regranulátu odebíraného ze sila do dávkovacího zařízení pro zpětné zpracování. V tomto případě se hladina zásoby regranulátu udržuje na konstantní úrovni.

$$q_1 = q_2$$

q_1 - Objemový tok vstupujícího regranulátu

q_2 - Objemový tok odebíraného regranulátu

Porucha č.1:

Odebírací zařízení z důvodu poruchy, ukončí svůj cyklus. Výroba fólie stále pokračuje, a v tuto chvíli, přichází do sila pro uchování regranulátu maximální množství regranulátu. Objem odebíraného materiálu zůstává zachován, a proto se hladina začíná zvyšovat.

$$q_1 > q_2$$

Porucha č.2:

Při této poruše dochází ke snižování hladiny v sila. Děje se to v případě nevyhovující kvality fólie, kdy není možné z technologických důvodů drtit fólii. Druhý případ je při rozjždění linky. Než dojde k seřízení fólie na požadovanou tloušťku a šířku, dochází k výrobě zmetkové fólie, která se také nedrtí a tím nevstupuje zpět do sila.

$$q_1 < q_2$$

5.2 Limit akčního zásahu

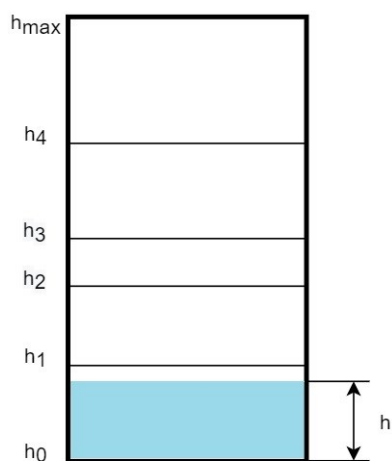
Poruchy vstupující do regulované soustavy hladinu zásoby zvyšují či snižují. Každý velký zásah, tedy skoková změna poměru regranulátu o velké procento, má velký vliv na kvalitu, vlastnosti fólie a kvalitu výsledného polotovaru. Velké zásahy do poměrů složek vedou jen k častějším poruchám zařízení vlivem zhoršené kvality fólie. Empiricky je ověřené, že změny poměru regranulátu v rozsahu 5-10 % nejsou pro chod výroby nikterak zásadní. Toto tvrzení platí za podmínky, že celá linka a jednotlivé procesy v ní nastavené, jsou také na optimální úrovni.

5.2.1 Nevýhody omezení akční veličiny

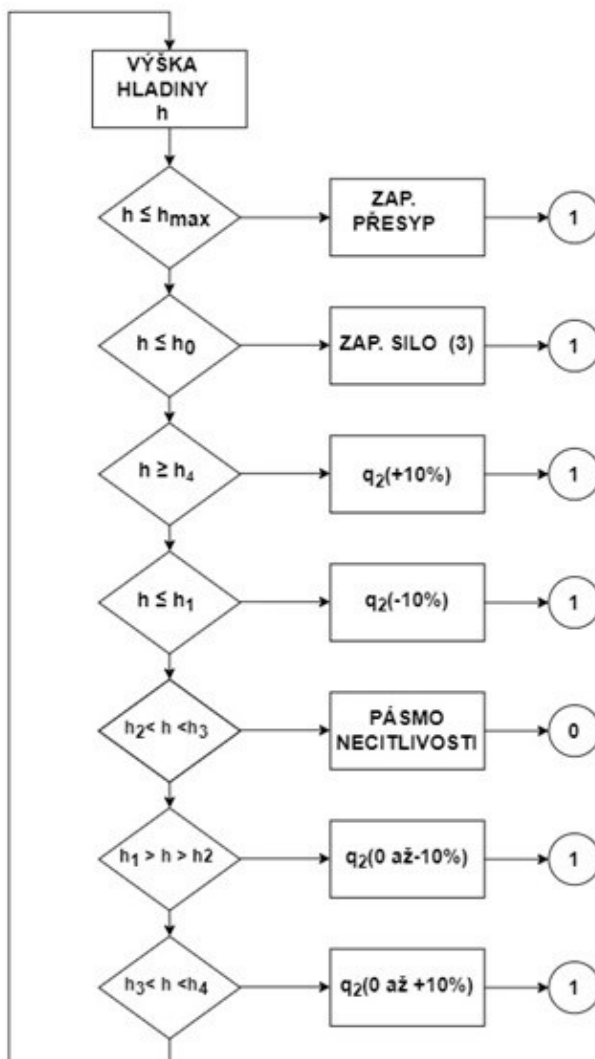
Je zřejmé, že při dlouhodobém působení poruchy dojde ke všem případům, které již byly popsány, a to i při nasazení mezi akčního zásahu do regulovaného systému. Pro udržení stability procesu výroby celé linky je nepřipustné regulovat v celém rozsahu od 0 až po 100 % poměru regranulátu. Z ekonomického hlediska, pokud porucha trvá příliš dlouho je výhodnější linku zcela zastavit, problém vyřešit při zastavené lince a tím zamezit, aby nedocházelo ke zbytečné výrobě fólie a plýtvání energií. Limitní regulace nám tedy dá potřebný čas na vyřešení poruchy, a bude schopna se zpět vrátit do výchozího optimálního stavu. Pokud ale dojde k dosažení maximální či minimální úrovně hladiny, je na místě zvážit ekonomičnost výroby při dlouhodobém působení poruchy.

5.3 Navržený algoritmus

Pro splnění všech výše zmiňovaných podmínek byl vybrán způsob řízení výšky hladiny v síle s algoritmem víceúrovňového regulátoru s penalizací akční veličiny. Celý proces řízení je znázorněn na vývojovém diagramu obr. 32, a na obr. 31 je znázorněno, jak byly voleny indexy h . Pokud hladina přesáhne maximální hladinu h_{\max} , zapne se odsyp regranulátu do přeřadového vaku. Mezi úrovní hladiny h_2 a h_3 je pásmo necitlivosti. To znamená, že v tomto pásmu nebude docházet k žádnému akčnímu zásahu. Pokud hladina přesáhne úroveň h_4 zvýší se odběr (q_2) regranulátu ze síla o 10 %. Při poklesu hladiny pod úroveň h_1 dojde ke snížení odběru o 10 %. Mezi pásmem h_3 a h_4 dochází k lineárnímu nárůstu od 0 až 10 %. Podobně se bude chovat regulace mezi pásmem h_2 a h_1 ale v tomto případě to bude pokles od 0 až po 10 %.

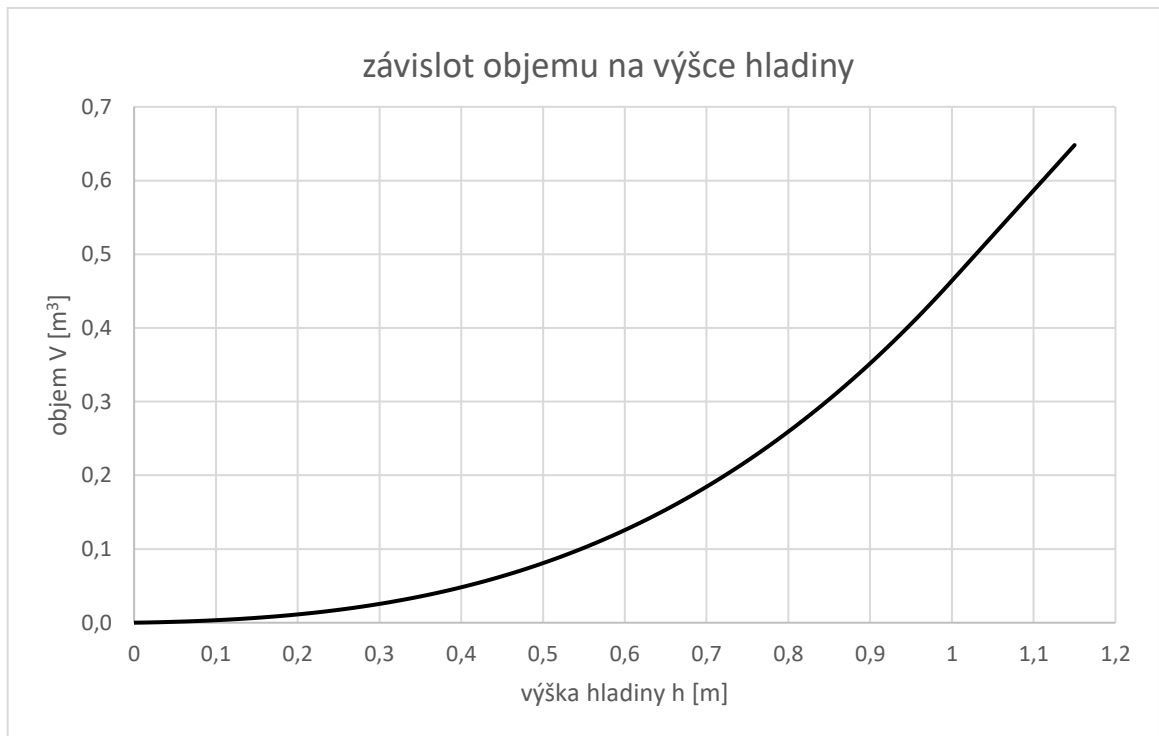


Obr. 31 Volba indexů h



Obr. 32 Vývojový diagram

Ještě před vytvořením modelu navrženého algoritmu regulátoru bylo nutné určit výšky hladin ve kterých budou probíhat akční zásahy. Hladinu na konstantní úrovni chceme udržovat na úrovni cca 30 % objemu sila. Z grafu (obr. 33) byla zvolena hodnota h_2 (0.72 m) a h_3 (0.77 m). Tím bylo tedy zvolené pásmo necitlivosti, ve kterém nebude probíhat žádný akční zásah. Hodnota h_{\max} je dána konstrukcí sila tj. 1.15 metrů.



Obr. 33 Graf závislosti objemu na výšce hladiny v silu

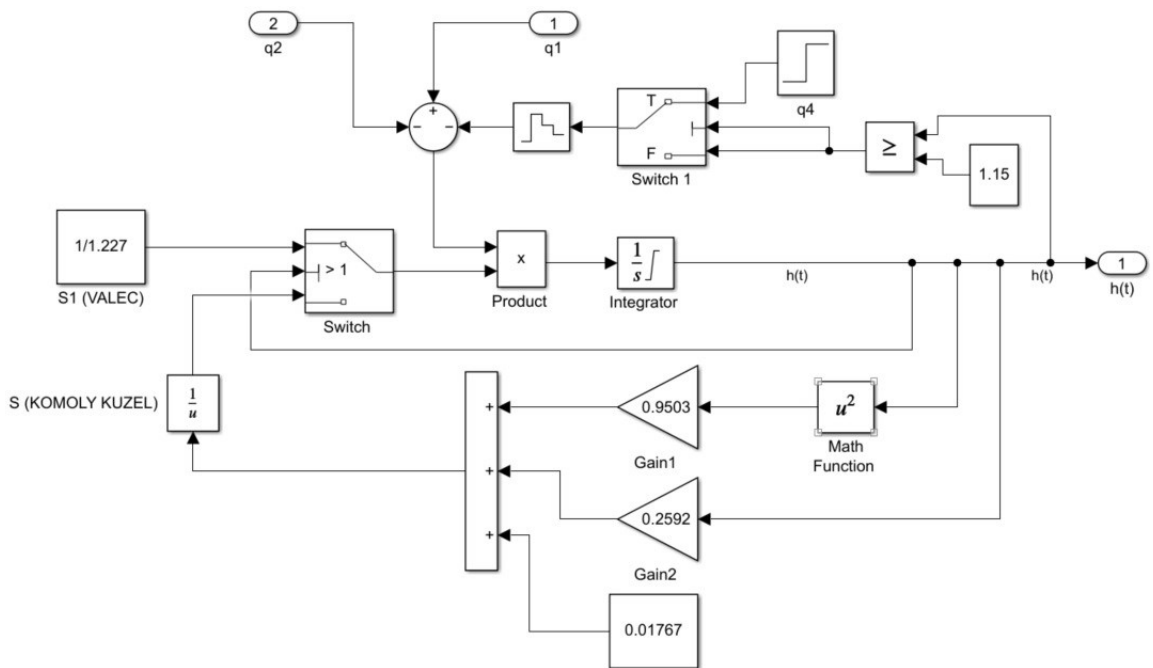
Tabulka 1 Zvolené hodnoty h

h	V	h	V
0,63	0,142	0,76	0,227
0,64	0,147	0,77	0,235
0,65	0,153	0,78	0,243
0,66	0,159	0,79	0,251
0,67	0,165	0,8	0,259
0,68	0,172	0,81	0,268
0,69	0,178	0,82	0,276
0,7	0,185	0,83	0,285
0,71	0,191	0,84	0,294
0,72	0,198	0,85	0,303
0,73	0,205	0,86	0,313
0,74	0,212	0,87	0,322
0,75	0,22	0,88	0,332

Od pásma necitlivosti byly odvozené následující hodnoty, od kterých bude akční zásah již trvalý. Spodní mez h_1 (0.63 m) a horní mez h_4 (0.87 m). Ve vývojovém diagramu je ještě definované zapnutí sila (3) při nulové hladině. Zařazením této funkce do stávajícího řízení bude možné využít v současnosti nevyužívaný zásobník kde se má zpracovávat obsah přepadového vaku. Pokud se tedy hlavní silo vyprázdní, v řídicím systému by mělo dojít k přepnutí odběru ze sila (3). V simulačním modelu není tato funkce aplikovaná.

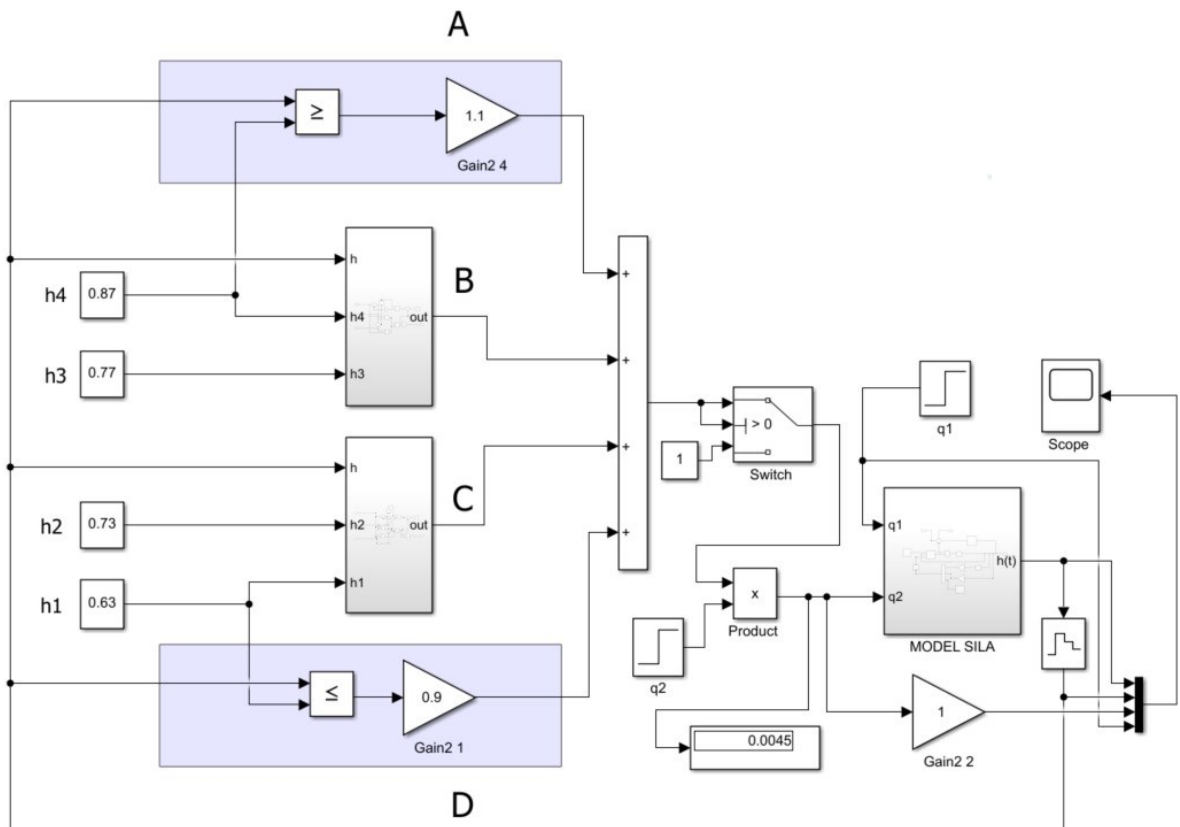
5.4 Model regulačního obvodu

Do simulačního modelu byla přidána funkce, kterou stávající zařízení již obsahuje. Při dosažení maximální hladiny (1.15 m) se spustí odsyp do přepadového vaku. Snaha byla se co nejvíce přiblížit reálnému zařízení. Překročením maximální hladiny se na 2 sekundy zapne odběr q_4 , který charakterizuje rychlost odsypu do přepadového vaku a je nastavený na hodnotu $1 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$.



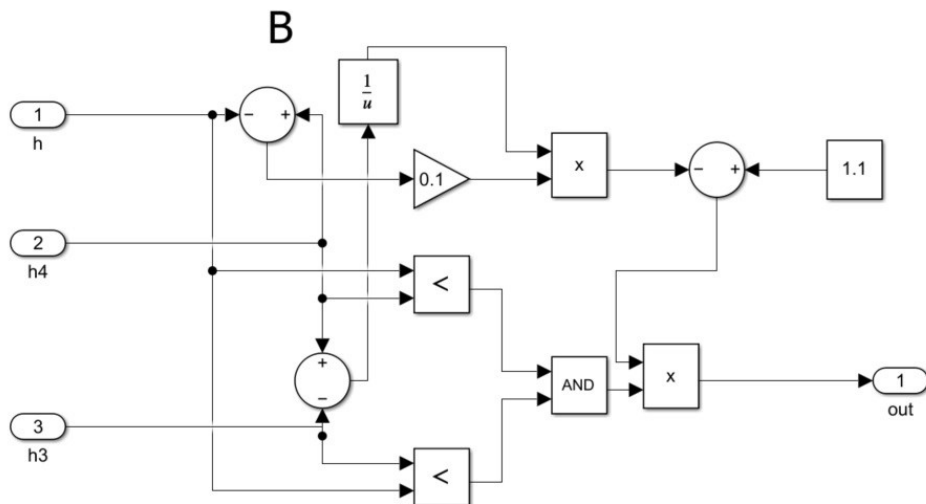
Obr. 34 Matematický model s funkcí odsypu do přepadového vaku

Pro přehlednost zapojení s regulačním obvodem je z výše zobrazeného schématu vytvořen subsystém. Algoritmus regulátoru, působící na model sila je zobrazen na obr. 35.



Obr. 35 Schéma regulačního obvodu

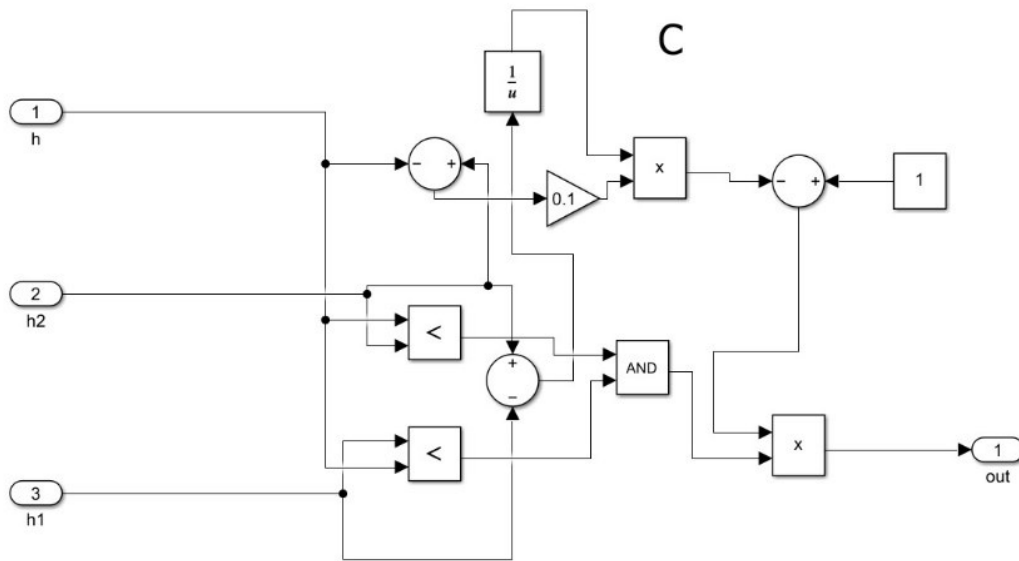
Jednotlivé bloky regulátoru jsou totožné s navrženým vývojovým diagramem. Blok označený A a blok označený D tedy pouze zesilují a zeslabují odběr q_2 v rozmezí $\pm 10\%$. Na obr. 36 je vysvětlena funkce subsystému B.



Obr. 36 blokové schéma subsystému B

Subsystem B obsahuje algoritmus výpočtu akčního zásahu s lineárním nárustem a vychází z následující rovnice:

$$u = 1.1 - \left(\frac{h_4 - h}{h_4 - h_3} \right) \cdot 0.1$$



Obr. 37 blokové schéma subsystému C

Subsystem C vychází z rovnice:

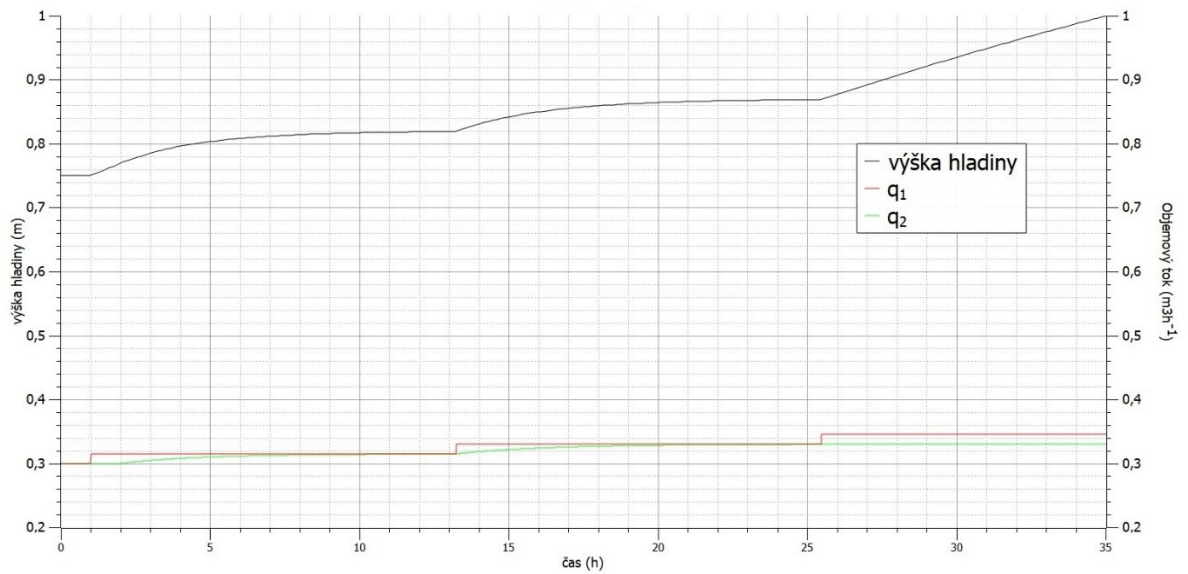
$$u = 1 - \left(\frac{h - h_1}{h_2 - h_1} \right) \cdot 0.1$$

5.5 Ověření regulačního obvodu

Pro ověření správné funkce regulačního obvodu byly zvoleny následující hodnoty odvozené z již zmiňované výroby fólie o tloušťce 1.3 mm. Objemový tok regranulátu, pokud stroj vyrábí a tvarovací stroj vysekává z fólie polotovar, je pro simulační účely určený na 50 % z objemové toku plné fólie. Po zaokrouhlení jsou hodnoty následující.

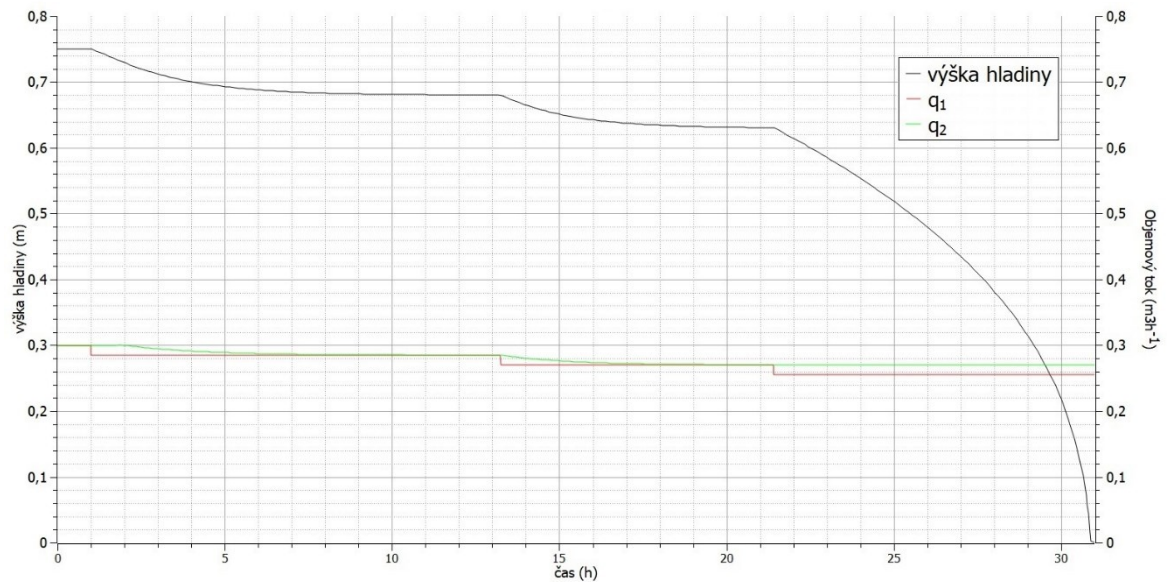
$$q_1 = 0.3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$$

$$q_2 = 0.3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$$



Obr. 38 Graf zvyšování přítoku

Výchozí stav je hladina na konstantní úrovni. Po jedné hodině byl zvýšen přítok q_1 o 5 % a po každém ustálení hladiny došlo k dalšímu navýšení o 5 %. Při navýšení přítoku q_1 celkem o 15 % již k ustálení nedošlo. Tímto byla potvrzena funkčnost regulačního obvodu a schopnost reagovat na změny přesně v definovaném rozsahu 10 %.

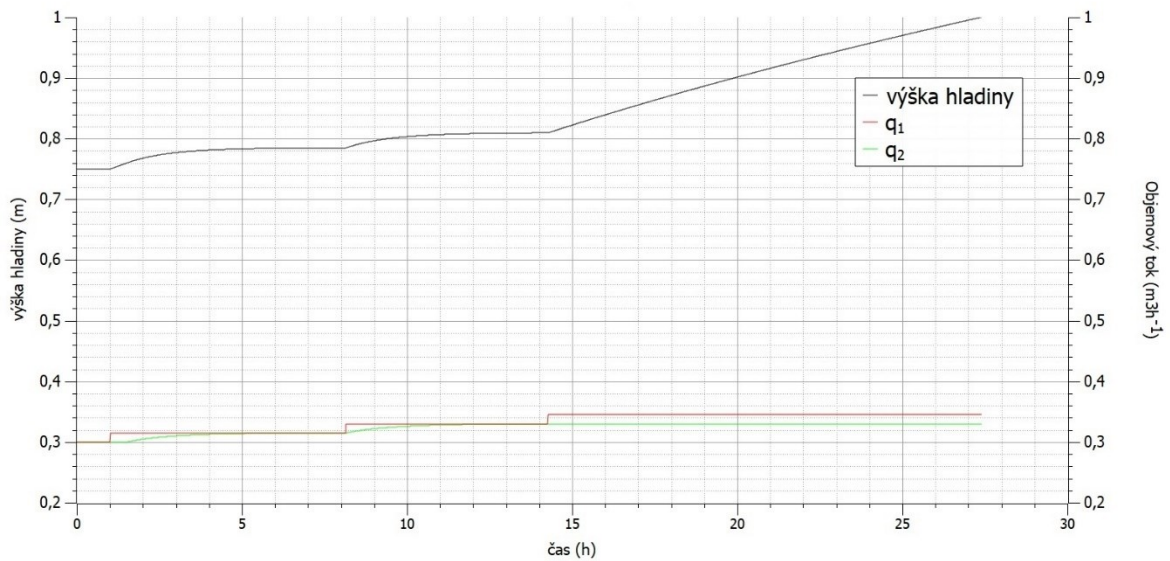


Obr. 39 Graf snižování přítoku

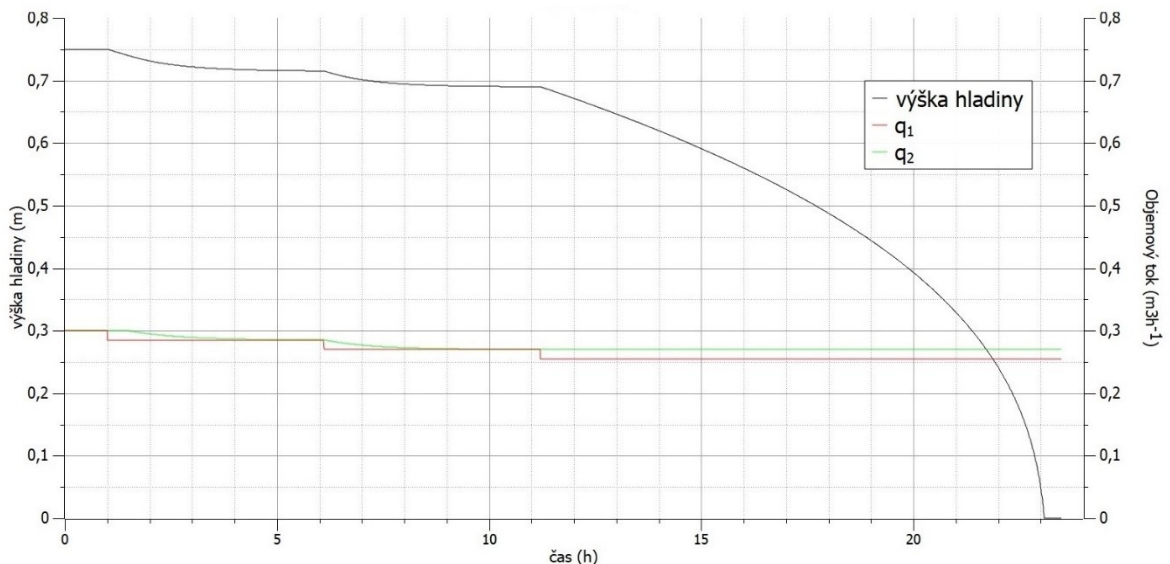
Funkčnost regulačního obvodu byla ověřena také pro pokles hladiny (obr. 39) a při stejných hodnotách. Snižováním přítoku o 5 % došlo ke stejným výsledkům. Po snížení přítoku o 15 % se již hladina nedokázala ustálit.

Při stejném postupu byl regulační obvod ověřený pro jiné mezní hodnoty:

$h_1=0.68$ m, $h_2=0.73$ m, $h_3=0.76$ m, $h_4=0.81$ m



Obr. 40 Graf zvyšování přítoku pro jiné mezní hodnoty



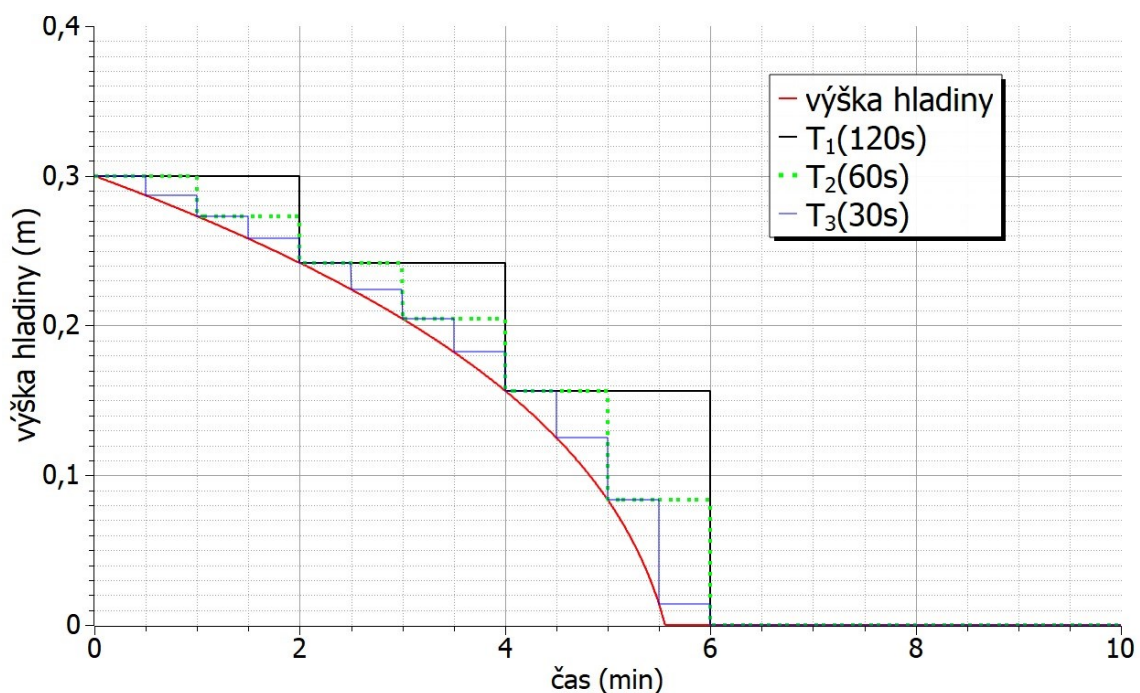
Obr. 41 Graf snižování přítoku pro jiné mezní hodnoty

Snižováním pásma necitlivosti o 2 cm a mezi regulačního zásahu o 5 cm, se ustálení hladin výrazně zrychlilo. Na základě tohoto zjištění je nezbytné, aby v panelu dávkovacího zařízení byly tyto hodnoty nastavitelné. Snižováním a zvyšováním mezí se může docílit lepšího

průběhu regulace. Další důležitá stavitelná hodnota je velikost zesílení či zeslabení odběru q_2 . Pro různé vyráběné artikly je možné poté volit jiné rozmezí regulace. Portfolio výrobků, které se na daném stroji vyrábí je široké. Každý artikl je jinak náchylný na změny viskozity a např. pro výrobu transparentních kelímků se můžeme pohybovat v rozmezí +/- 20 % poměru regranulátu.

5.6 Volba periody vzorkování

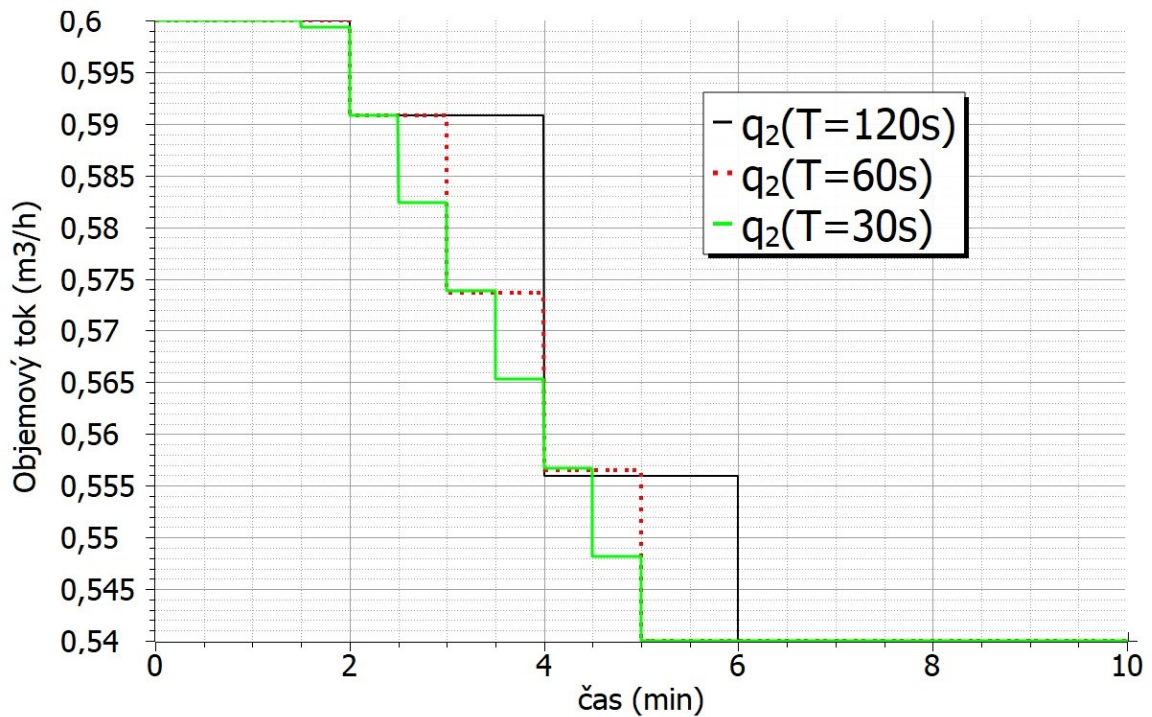
Blok „Zero-Order-Hold“ (obr. 35), který je připojený na výstup modelu sila převádí spojitý signál na diskretní. Regulační algoritmus už nepracuje se spojitým signálem ale se signálem diskretním. Tato funkce je do simulace přidána z důvodu, že řízení bude řešeno pomocí průmyslového počítače. Volba periody vzorkování je v tomto případě důležitá ze dvou důvodů. Nastavením příliš malé vzorkovací periody, by mohlo docházet k častému zrychlování a zpomalování šnekového dopravníku. Tím by se mohla zkrátit jeho životnost. Volba příliš velké periody by způsobila pozdní reakci systému na změny výšky hladiny. Tím by mohlo dojít k nežádoucím skokovým změnám akční veličiny.



Obr. 42 Volba perioda vzorkování

Nejrychlejší pokles hladiny je ve spodní části sila. V těchto místech se nejvíce projeví zvolená vzorkovací frekvence. Na vstup byl přiveden nulový tok a odběr byl ponechán na hodnotě $q_2=0.0051 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$. Při těchto zvolených hodnotách je patrné, že vzorkovací frekvence

2 minuty je příliš velká a mohlo by dojít k pozdní detekci nulové hladiny a přepnutí odběru ze sila č. 3. Reakce akční veličiny na délku vzorkovací periody byla ověřena pro dvojnásobnou rychlost odběru. Na vstup q_1 byla nastavena 0 a výstup q_2 byl nastaven na hodnotu $0.6 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$. Při mezních hodnotách akčního zásahu $h_1=0.68 \text{ m}$, $h_2=0.73 \text{ m}$, $h_3=0.76 \text{ m}$, $h_4=0.81 \text{ m}$ a zesílení $\pm 10 \%$.

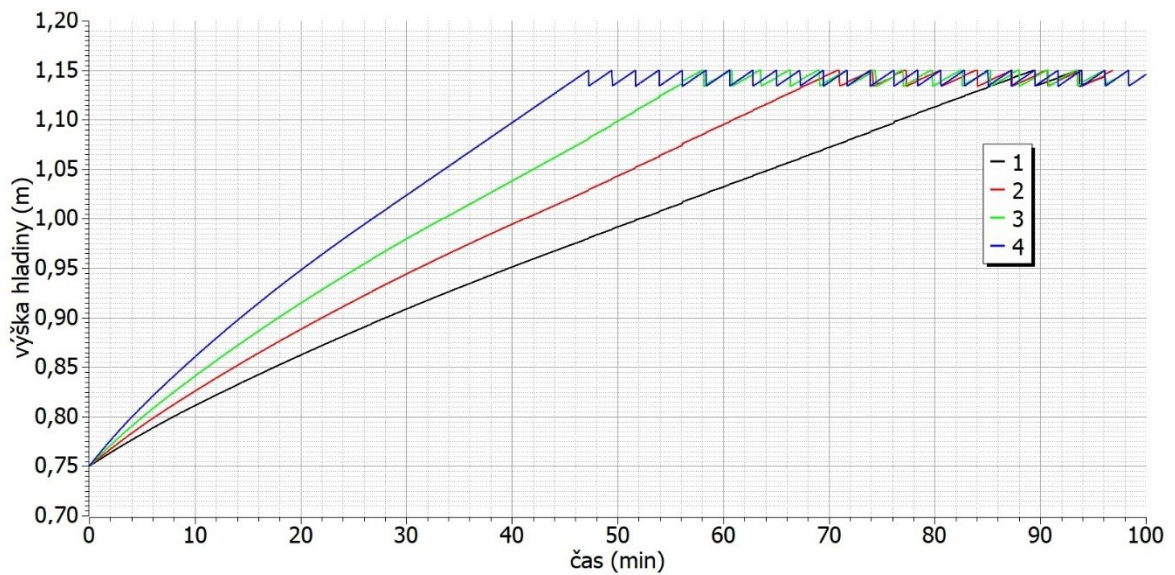


Obr. 43 Vliv vzorkovací periody na q_2

Na grafu je patrné, že při dvojnásobné rychlosti odběru by docházelo k velkým skokům akčního zásahu při zvolených periodách 120 a 60 s. Pro plynulejší změnu akční veličiny a detekci nulové hladiny je volba periody 30 s plně dostačující.

5.7 Reálné působení poruchy

Při běžné výrobě je nejčastější porucha, kdy dojde ke zvýšení přítoku q_1 na svoje maximum. Vycházíme z odběru v podobě 50 % při bezporuchovém chodu. Na následujícím grafu je zobrazen průběh, při kterém dojde k dosažení maximální hladiny při dlouhodobé působení poruchy, a tedy přesypávání regranulátu do přepadového vaku. Mezní hodnoty byly nastaveny na: $h_1=0.68 \text{ m}$, $h_2=0.73 \text{ m}$, $h_3=0.76 \text{ m}$, $h_4=0.81 \text{ m}$. Regulační zásah je v rozmezí $\pm 10 \%$.

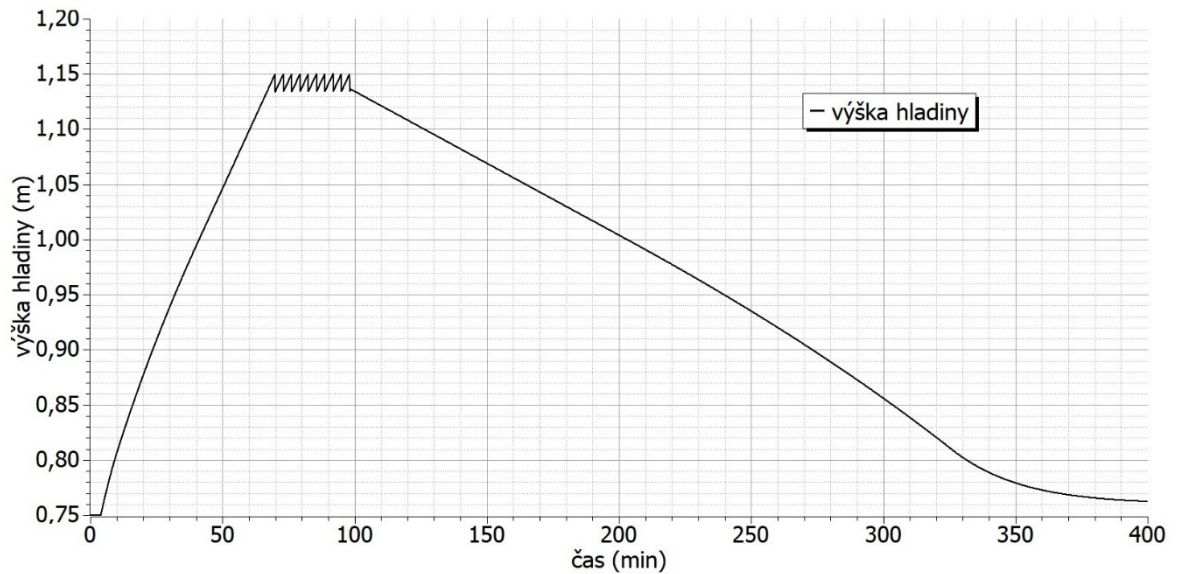


Obr. 44 Dosažení maximální hladiny při působení poruchy

 Tabulka. 2 Zvolené hodnoty q_1 a q_2

	1	2	3	4
q_1 ($\text{m}^3 \text{min}^{-1}$)	0,0102	0,013	0,016	0,02
q_2 ($\text{m}^3 \text{min}^{-1}$)	0,0051	0,0065	0,008	0,01
Dosažení max. hladiny (min) (bez regulace)	84	66	53	43
Dosažení max. hladiny (min) (regulace +/- 10 %)	92	73	59	47
Dosažení max. hladiny (min) (regulace +/- 20 %)	103	81	66	53

Získaná data z tabulky ukazují, že pomocí regulace může dojít k výraznému prodloužení doby, než hladina dosáhne své maximální úrovně. Tím se zvětšuje doba seřizování výroby, při které často dochází k přesypu materiálu do přepadového vaku. V praxi je zcela běžné, že stroj trvá seřítit i několik hodin. Během této doby dochází k častým poruchám a k plnění síla. Jednou z hlavních výhod aplikace regulačního algoritmu je, že po seřízení výroby se výška hladiny dokáže vrátit na optimální úroveň bez zásahu obsluhy viz obr. 45.



Obr. 45 Průběh výšky hladiny od maxima k ustálení

5.8 Nastavení parametrů

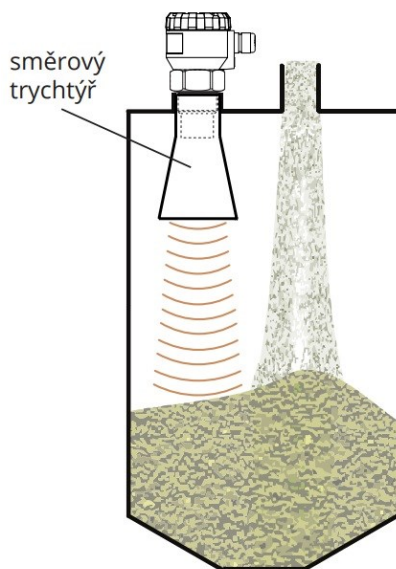
Pro simulační účely byly voleny hodnoty pouze pro výrobu polypropylenu, kde je větší dynamika zvyšování hladiny. V simulaci nebyla vyzkoušená regulace při výrobě EVOH fólie. Při využití 70 % regranulátu by nárůst při drcení plné fólie byl pouze 30 %. To by znamenalo velmi pomalý průběh při působení poruchy. I přesto je potřeba zmínit, že zpracování EVOH regranulátu způsobuje značné komplikace. Zejména zvýšení poměrů tohoto regranulátu se musí volit velmi opatrně. Už při nepatrném navýšení o několik procent se můžou projevit negativní vlastnosti fólie, které vedou ke špatnému vyseknutí polotovaru. To se projeví na lemu kelímků, kdy na něm zůstane kus fólie. Naopak snížení odběru může být daleko větší. Snížení poměru EVOH fólie ze 70 % na 50 % může naopak výrobku prospět, pokud se dodrží plynulost této změny. Při nastavitelných parametrech se proto může volit zesílení odběru $q_2 + 5\%$ a zeslabení klidně 20 %. V případě, že se projekt bude aplikovat na stávající řízení, bude ještě potřeba na každý typ fólie určit optimální meze a působnost akční veličiny.

6 NÁVRH ÚPRAV A ZHODNOCENÍ

Celý návrh nezbytných úprav zařízení zahrnuje poměrně málo úkonů. Celkově se jedná o 2 stěžejní body. Prvním bodem je instalace snímače výšky hladiny do horní části sila. Druhý bod je úprava stávajícího programu řízení poměrů regranulátu a nového materiálu.

6.1 Vybraný hladinoměr

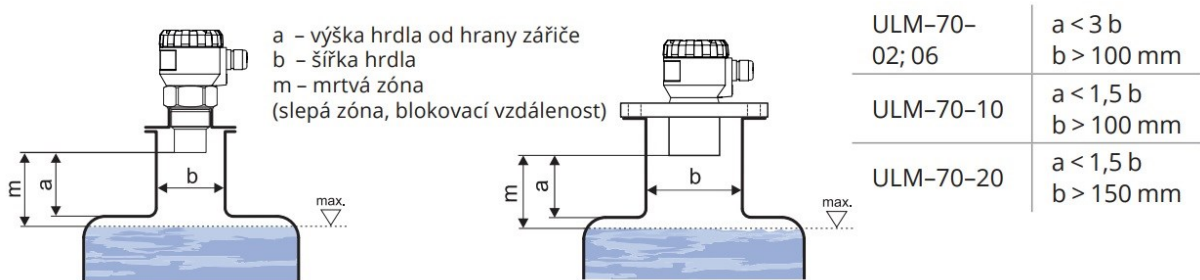
Na základě poznatků z výroby, a zvážení všech okolností ovlivňující měření, se jeví jako plně dostačující použití ultrazvukového snímače. Jedno kritérium pro výběr vhodného produktu, bylo vybrat snímač s dostatečným dosahem, a tzv. minimální mrtvou zónou. Víko nádrže je umístěné 15 cm nad maximální hladinou. Maximální výška hladiny od spodní podstavy komolého kužele je 115 cm. S přihlédnutím k této skutečnosti se nabízí jako dostačující ultrazvukový snímač od firmy Dinel ULM-70N-02 (rozsah 0,1 – 2 m). Vzhledem k měřenému médiu, v našem případě sypkého regranulátu, je doporučení výrobce volit snímač s větším dosahem. Společnost Dinel uvádí, že vlivem pohlcení akustických vln u sypkých materiálů, dochází ke zkrácení měřicího rozsahu až o 50 %. Pro tento účel, je také vhodné použití směrového trychtýře znázorněného na obr. 46.



Obr. 46 Použití směrového trychtýře [10]

Směrový trychtýř snižuje zkrácení měřicího rozsahu a také vylepšuje citlivost odraženého signálu. Pro aplikaci v našich podmínkách je využití tohoto příslušenství nezbytné. I přes použití trychtýře jsem se rozhodl zvolit větší rozsah snímače. V nabídce společnosti Dinel se nabízí jako vhodná alternativa snímač ULM-70N-06 (rozsah 0,2 – 6 m). Problém nastává

s tzv. mrtvou zónou viz obr. 47. Maximální hladina je totiž příliš blízko, aby se snímač mohl připevnit k hornímu víku. Z tohoto důvodu bude nutná úprava sila, a to vyřezáním většího otvoru a navařením hrdla pro uchycení snímače. Vzhledem ke kompaktnímu řešení tohoto typu snímače by neměla být tato úprava složitá ani finančně náročná.



Obr. 47 Instalace hladinoměru [10]

6.2 Požadavky na úpravu programu

Hlavní požadavek kladený na firmu, která bude realizovat úpravu programu je nastavitelnost parametrů regulačního algoritmu. Jedná se o mezní hodnoty a velikost zesílení či zeslabení odběru regranulátu. Do budoucna se na lince plánují investice, které mají za cíl zvýšení produkce, a s tím svázaný zvýšený přítok a odběr regranulátu. Bez nastavitelných parametrů by fixně nastavené parametry nemusely uspokojit budoucí potřeby linky. Současné zařízení má světelnou signalizaci prázdného sila až v momentě, kdy nedojde k nasátí regranulátu do malého zásobníku. Při nulové hladině v silu je doporučení využití sila označeného číslem 3, které se nachází v jiné části haly a slouží pro zpracování obsahu přepadového vaku. Při využití druhého sila by nedošlo k signalizaci, že je hlavní silo prázdné. Proto řízení signalizace prázdného sila by mělo být vztaženo k nulové hladině.

6.3 Náklady na realizaci

První a stěžejní položkou pro realizaci projektu je pořízení snímače hladiny. Navrhovaný snímač hladiny se momentálně prodává za cenu 13 915 Kč. Další položkou na seznamu úprav zařízení je implementace algoritmu regulátoru do stávajícího řízení dávkování. Tento úkon momentálně nelze vyčíslit, a to z důvodu cenové politiky firmy, která dodává dávkovací zařízení. Montáž snímače a náklady na mechanickou úpravu sila nebudou vyčísleny. Celý proces instalace snímače je firma schopna realizovat pomocí vlastních zdrojů. Z těchto

důvodu nebude uvedena cena materiálu ani hodinový náklad mzdy, jedná se totiž o citlivé informace.

6.4 Očekávané úspory

Realizace tohoto projektu bude mít největší vliv na úsporu v podobě zvýšení využití regranulátu EVOH, který se akumuluje při plnění přepadového vaku. Pokud se jedná o regranulát ve formě polypropylenu, je tento materiál ještě dále zpracovatelný. V tomto případě by se jednalo převážně o úsporu časovou, kdy nemusí docházet k tak častým logistickým operacím. Jiná situace je při výrobě EVOH fólie. Tento regranulát, se z technologických důvodu uvedených v první části bakalářské práce, již dále nezpracovává a každý takto naplněný přepadový vak se posílá na recyklaci. Každý kilogram EVOH regranulátu, který se nezpracuje při výrobě, je reálně nahrazen kilogramem čistého polypropylenu. Za sledované období třech měsíců, bylo zjištěno, že se průměrně pošle k recyklaci okolo 500 kg regranulátu týdně. Po vynásobení počtem 52 týdnů se ročně takto vyprodukuje okolo 26 tun materiálů určeného k recyklaci.

Dle serveru plasticportal.cz je aktuální průměrná cena polypropylenu pro střední Evropu 2.45 euro za kilogram. Po přepočtu na současný kurz české koruny, vychází kilogram polypropylenu na 59.95 Kč. Po zaokrouhlení na 60 Kč a vynásobením počtem kilogramů recyklovaného EVOH regranulátu, zjistíme, že ročně se takto může ušetřit okolo 1 560 000 Kč.

Dále jen pro informaci uvedu přínosy realizace projektu, které nebudou předmětem výpočtu návratnosti investice. Mezi tyto přínosy patří:

- Časová úspora logistických operací spojených s výměnou přepadového vaku
- Časová úspora obsluhy panelu dávkovacího zařízení
- Snížení nákladů na reklamace způsobené současným řízením dávkování
- Snížení časů prostojů linky a tím spojené zvýšení produktivity stroje
- Snížení zmetkovitosti

6.5 Ekonomické zhodnocení

Pro ekonomické zhodnocení investice jsem zvolil výpočet návratnosti investice ROI (Return on investments). Po dosazení do této rovnice získáme procentuální návratnost investice za jeden rok.

$$ROI = \left(\frac{\text{výnosy} - \text{investice}}{\text{investice}} \right) \cdot 100$$

Na straně výnosů bude uvedena pouze jedna položka, a to úspora v podobě zvýšení využití regenerulátu EVOH, která je odhadována na 1 560 000 Kč za rok. Investice se dělí na tyto části:

- náklady na pořízení snímače (13 915 Kč).
- implementace regulačního algoritmu do stávajícího systému řízení (IA)
- náklady na úpravu sila (ÚS)

$$ROI = \left(\frac{1\,560\,000 - 13\,915 + IA + ÚS}{13\,915 + IA + ÚS} \right) \cdot 100$$

I přes nemožnost vyjádřit přesnou částku, kterou si bude firma účtovat za softwarovou úpravu zařízení, je možné předpokládat, že návratnost bude v řádech měsíců. Celý návrh obsahuje poměrně málo úkonů a realizace se může provést během běžných odstávek provozu spojených s pravidelnou údržbou.

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo najít způsob řešení daného problému zásobování linky regranulátem.

V teoretické části práci se podařilo popsat současný stav řízení zásobování vytlačovací linky regranulátem a popsat slabá místa. V dalších kapitolách praktické části byly popsány možné způsoby řešení daného problému jak po stránce měřicí, tak po stránce regulační. Na konci každé kapitoly je uveden použitý konkrétní způsob regulace a měření výšky hladiny v silo.

V praktické části byl vytvořen matematický model plnění silo pro uchování regranulátu. Tento model byl následně ověřen a na základě zjištění, že průběh výšky hladiny odpovídá co možná nejvíce skutečnému průběhu byl dále použit pro účely simulace. Následně byly aproximovány vstupní hodnoty, které posloužily pro simulaci reálného průběhu plnění silo. V páté kapitole byl představen regulační algoritmus, který měl za cíl respektovat technologické nároky zpracování regranulátu a odstranit nutnost obsluhy ručně zasahovat do řízení poměrů dávkování. Ještě před ověřením regulačního algoritmu byly popsány nejběžnější poruchy, které vstupují do regulované soustavy. Regulační algoritmus a matematický model silo byl vytvořený v programu Matlab, konkrétně v nadstavbovém prostředí Simulink. V další části bylo potvrzeno, že navržené řešení dokáže regulovat výšku hladiny s důrazem na plynulost nárůstu a omezení akčního zásahu. Tím byl splněn cíl práce, a nutnost obsluhy zasahovat do poměru dávkování by tímto způsobem řízení měla být odstraněna. Pro navržené řešení je důležité, aby byly parametry regulace nastavitelné. Během simulace různých případů poruch, které mohou nastat, jsem došel k závěru, že nastavitelností parametrů regulace se může celý proces řízení přizpůsobovat konkrétnímu výrobku a tím vylepšit kvalita regulace.

Na závěr praktické části došlo k ekonomickému zhodnocení. Výstupem tohoto zhodnocení je možnost říct, že návratnost realizace bude v řádech několika měsíců. Při budoucím nárůstu produkce dané linky, je možno předpokládat ještě větší úspory, než jsou v poslední části uvedené.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MARTINEK, Radislav. *Senzory v průmyslové praxi*. Praha: BEN – technická literatura, 2004. ISBN isbn80-7300-114-4.
- [2] *Inteligentní senzory* [online]. Liberec: Michna, 2012 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: http://www.kts.tul.cz/content/files/podklady/In-TECH2_Inteligentni%20senzory_ver1.pdf
- [3] VOJÁČEK, Antonín. Spojité měření výška hladiny - principy měření a provedení snímačů. *Automatizace* [online]. 2016 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/spojite-mereni-vyska-hladiny-principy-mereni-a-provedeni-snimacu.html>
- [4] *Automatizace a automatizační technika*. Praha: Computer Press, 2000. Všechny cesty k informacím. ISBN isbn80-7226-248-3.
- [5] BENEŠ, Pavel. *Automatizace a automatizační technika: prostředky automatizační techniky*. 5., rozš. a aktualiz. vyd. Brno: Computer Press, 2014. ISBN isbn978-80-251-3747-5.
- [6] Radioizotopové hladinoměry. *JSP Industrial Controls* [online]. [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: http://www.jsp.cz/cz/sortiment/seznam_dle_kategoriei/snimace_hladiny/teorie-hladina/radioizotopove-hladinomy/pouziti-radioizotopovych-hladinomeru.html
- [7] ŠVARC, Ivan. *Automatické řízení*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN isbn978-80-214-4398-3.
- [8] *Automatizace a automatizační technika: systémové pojetí automatizace*. Brno: Computer Press, 2014. ISBN isbn978-80-251-4106-9.
- [9] ŠULC, Bohumil a Miluše VÍTEČKOVÁ. *Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN isbn80-01-03007-5.
- [10] *DATALISTY* [online]. Zlín: Dinel, 2022 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <https://www.dinel.cz/ke-stazeni/datalisty>
- [11] Triangulační princip měření. In: *Automatizace.hw.cz* [online]. 2015 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz//files/uploads/storyautomat/6701/laser-triangulation.gif>

- [12] VAŠEK, Vladimír. Studijní pomůcka pro přednášky z předmětu Diskrétní řízení. Interní studijní materiál FAI/UTB, Zlín, 2009.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

EVOH	Ethylene vinyl alcohol
PLC	Programmable Logic Controller
PID	Proporcionálně-Integračně-Derivační
ROI	Return on investments
IA	Implementace algoritmu
ÚS	Úprava síla

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Pohled na výrobní linku inline 21.....	11
Obr. 2 Blokové schéma linky inline 21	12
Obr. 3 Systém dávkování materiálů.....	12
Obr. 4 Tříválcový kalandr.....	13
Obr. 5 Silo s regranulátem a rozmístění čidel výšky hladiny	14
Obr. 6 Malý zásobník s regranulátem	15
Obr. 7 Panel dávkovacího zařízení	16
Obr. 8 Dávkovací zařízení	16
Obr. 9 Umístění senzorů v automatizačním zařízení [1]	19
Obr. 10 Princip ultrazvukového hladinoměru [3].....	20
Obr. 11 Princip radarového hladinoměru s vedenou vlnou [3].....	21
Obr. 12 Princip kapacitního hladinoměru [3]	22
Obr. 13 Triangulační princip laserového měření [11]	23
Obr. 14 Princip Radioizotopového hladinoměru [6]	23
Obr. 15 Blokové schéma regulačního obvodu [7]	25
Obr. 16 Přepínací charakteristika dvupolohového regulátoru [8].....	26
Obr. 17 Charakteristika dvupolohového regulátoru s hysterezí [8].....	27
Obr. 18 Charakteristika třípolohového regulátoru s hysterezí [8]	27
Obr. 19 Třípolohový regulátor s penalizací akční veličiny a hysterezí [12].....	28
Obr. 20 Přechodová charakteristika regulátoru typu P [7]	30
Obr. 21 Přechodová charakteristika regulátoru typu I [7]	30
Obr. 22 Přechodová charakteristika Derivačního členu [7].....	31
Obr. 23 Přechodová charakteristika PI regulátoru [7]	31
Obr. 24 Přechodová charakteristika PD regulátoru [7].....	32
Obr. 25 Přechodová charakteristika PID regulátoru [7]	32
Obr. 26 Rozměry sila pro uchování regranulátu.....	35
Obr. 27 Model sila regranulátu	37
Obr. 28 Výpočet hladiny komolého kužele	38
Obr. 29 Schéma matematického modelu sila.....	41
Obr. 30 Průběh plnění sila	41
Obr. 31 Volba indexů h.....	44
Obr. 32 Vývojový diagram	44

Obr. 33 Graf závislosti objemu na výšce hladiny v síle	45
Obr. 34 Matematický model s funkcí odsypu do přepadového vaku	46
Obr. 35 Schéma regulačního obvodu.....	47
Obr. 36 blokové schéma subsystému B	47
Obr. 37 blokové schéma subsystému C	48
Obr. 38 Graf zvyšování přítoku	49
Obr. 39 Graf snižování přítoku	49
Obr. 40 Graf zvyšování přítoku pro jiné mezní hodnoty	50
Obr. 41 Graf snižování přítoku pro jiné mezní hodnoty	50
Obr. 42 Volba perioda vzorkování	51
Obr. 43 Vliv vzorkovací periody na q_2	52
Obr. 44 Dosažení maximální hladiny při působení poruchy	53
Obr. 45 Průběh výšky hladiny od maxima k ustálení	54
Obr. 46 Použití směrového trychtýře [10]	55
Obr. 47 Instalace hladinoměru [10]	56

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Zvolené hodnoty h	45
Tabulka. 2 Zvolené hodnoty q_1 a q_2	53