ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta elektrotechnická
Katedra řídicí techniky
K13135

Bakalářská práce
X35BP

Fyzikální model procesu odlévání železa

2008 Libor Ptáček

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Libor Ptáček**

Studijní program: Elektrotechnika a informatika (bakalářský), strukturovaný
Obor: Kybernetika a měření

Název tématu: **Fyzikální model procesu odlévání železa**

Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte a navrhněte vhodné způsoby a metody používané při vypracování fyzikálního modelu a jejich konkrétní možnosti použití na tomto modelu.
2. Prostudujte princip kontinuálního odlévání železa a proveďte rozbor technických parametrů a jejich popisu.
3. Zrealizujte fyzikální model zařízení podle předem specifikovaných technických parametrů.
4. Proveďte simulaci fyzikálního modelu a zhodnoťte dosažené výsledky
5. Zhodnoťte práci a navrhněte další postup.

Seznam odborné literatury:

P. Noskievič: Modelování a identifikace systémů, Montanex a.s., 1999;
V. Vlk: Fyzikální modelování pochodů při plynulém odlévání oceli, VŠB - Technická univerzita Ostrava, dizertační práce, 2001

Vedoucí: Ing. Petr Hušek, Ph.D.

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2008/2009

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

L.S.

doc. Ing. Boris Šimák, CSc.
děkan

V Praze dne 29. 2. 2008

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta elektrotechnická
Katedra řídicí techniky
K13135

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze, dne 10.6.2008

Ptáček
.....
podpis

Anotace

Tato bakalářská práce popisuje proces kontinuálního odlévání železa a vytvoření jeho matematicko-fyzikálního modelu. V práci je shrnut technologický postup při kontinuálním odlévání železa a ze znalostí fyzikálních zákonitostí mechaniky tekutin je pomocí simulačního programu Matlab-Simulink realizován model, který je určen pro návrh regulátorů pro řízení odlévací rychlosti.

Abstract

This bachelor-degree diploma thesis describes a continuous iron casting and realization of the mathematical-physical model of this process. In the thesis is summarized technological process used in the continuous iron casting and from physical principles of the mechanics of liquids is realized the model by using the computer programme Matlab Simulink. This model is supposed to be used for designing and testing of the casting speed compensators.

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Huškovi,Ph.D., který se cennými radami a svými zkušenostmi nemalou měrou zasloužil o vznik této práce.

Poděkování také patří firmě atx, technická kancelář pro komplexní automatizaci, spol. s r.o., která mě v průběhu vzniku této práce finančně a materiálně podporovala.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat rodině, přátelům a kolegům, kteří mi poskytovali psychickou podporu a inspiraci nejenom při psaní této práce.

Obsah:

1. ÚVOD 8

1.1. Technologický postup kontinuálního lití 11

1.2. Popis jednotlivých částí zařízení 11

1.2.1. Revolverová hlavice a pánev 12

1.2.2. Nálevka 14

1.2.3. Forma 16

1.2.4. Sekundární chlazení 17

1.2.5. Oblast válců 17

1.2.6. Ohyb a rovnání 18

1.2.7. Rovná část 20

2. MATEMATICKÉ A FYZIKÁLNÍ MODELOVÁNÍ 21

2.1. Možnosti realizace modelů 21

2.2. Způsoby modelování 22

2.3. Pojmy používané při modelování 23

2.4. Postup při tvorbě modelu 23

3. ZAŘÍZENÍ PRO KONTINUÁLNÍ ODLÉVÁNÍ ŽELEZA 23

3.1. Mechanika tekutin 24

3.1.1. Rovnice kontinuity 24

3.1.2. Bernoulliho rovnice 25

3.2. Parametry zařízení 26

3.2.1. Pánev 28

3.2.2. Nálevka 28

3.2.3. Forma 29

3.3. Popis vztahů mezi veličinami 29

3.3.1. Ideální kapalina – pánev 30

3.3.2. Ztrátové koeficienty 31

3.3.3. Reálná kapalina - pánev 31

3.3.4. Reálná kapalina - nálevka 32

3.3.5. Reálná kapalina - forma 32

3.4. Realizace modelu – Simulink 32

4. TESTOVÁNÍ MODELU 37

5. ZÁVĚR 40

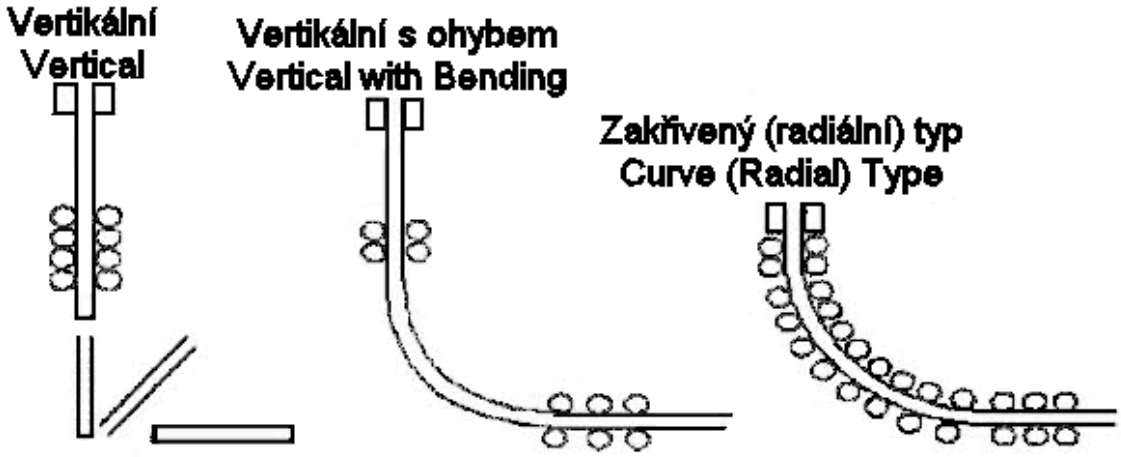
SEZNAM LITERATURY 42

PŘÍLOHY 43

1. Úvod

Do roku 1950 se železo zpracovávalo klasickou technologií odléváním roztaveného železa do stacionárních nádob – kokil, ze kterých se po ztuhnutí vyndaly ingoty různých tvarů a velikostí. Se vzrůstající industrializací roste i spotřeba železa. Aby mohla být poptávka po železe splněna, musela se vyvinout nová metoda jeho odlévání. Touto technologií se stalo kontinuální odlévání železa. S rostoucí automatizací samotného výrobní procesu se nadále zvětšuje objem produkce železa. Další zlepšení a urychlení výroby lze docílit dokonalejším návrhem řízení a monitorováním technologického procesu při zpracování železa. Zlepšení řízení výroby je důvodem vypracování této práce.

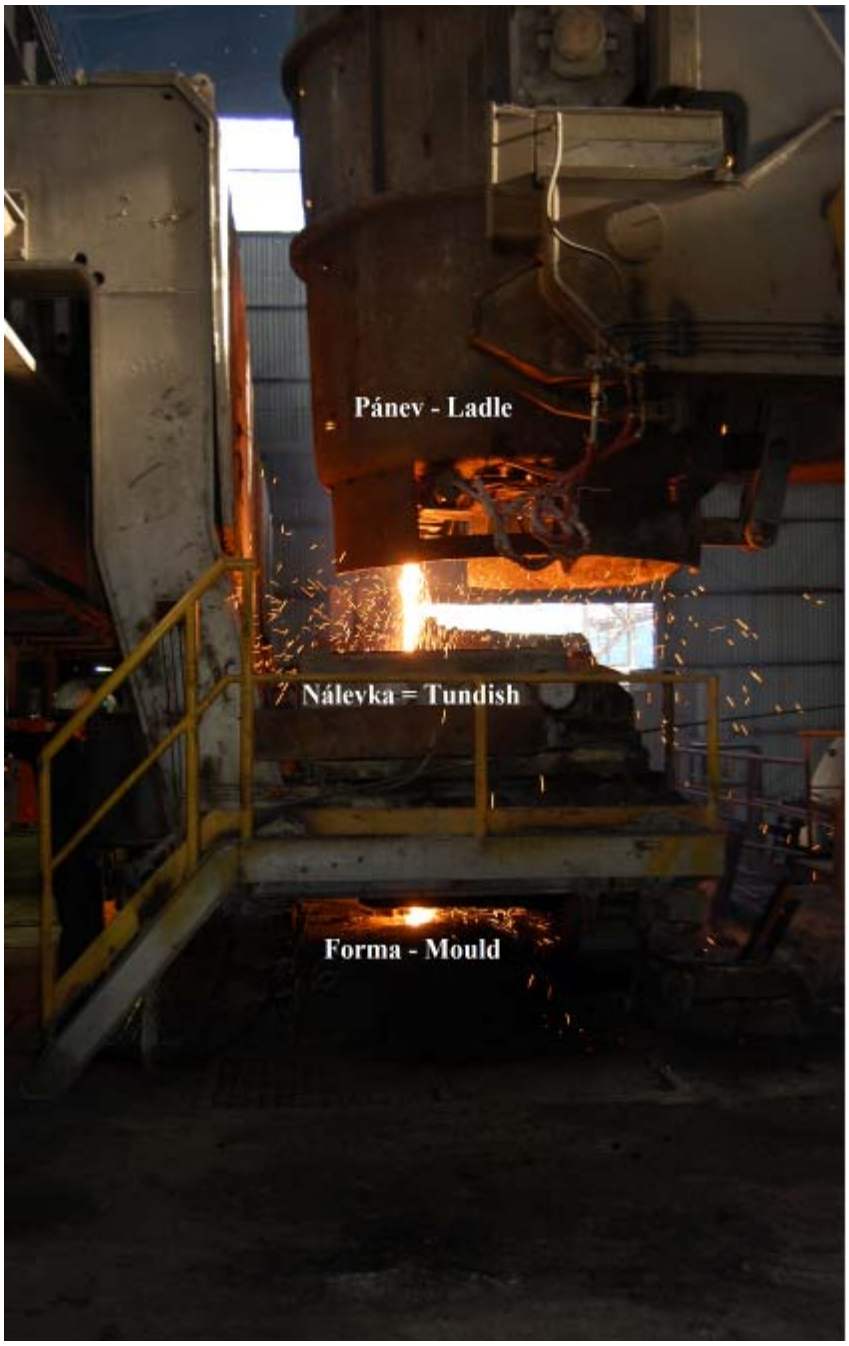
Železo se roztaví v elektrické peci a přelije se do pánví. Pánev se přemístí k zařízení na kontinuální odlévání železa. Než se pánev přesune k zařízení na kontinuální odlévání, je možné provést mimopecní úpravu a předzpracování železa. Existují různé konfigurace zařízení pro plynulé odlévání železa, z nichž několik jich je uvedeno na obr. 1.1. Nejběžnější je radiální konfigurace.



Obr. 1.1 – Jednotlivé konfigurace zařízení pro kontinuální lití

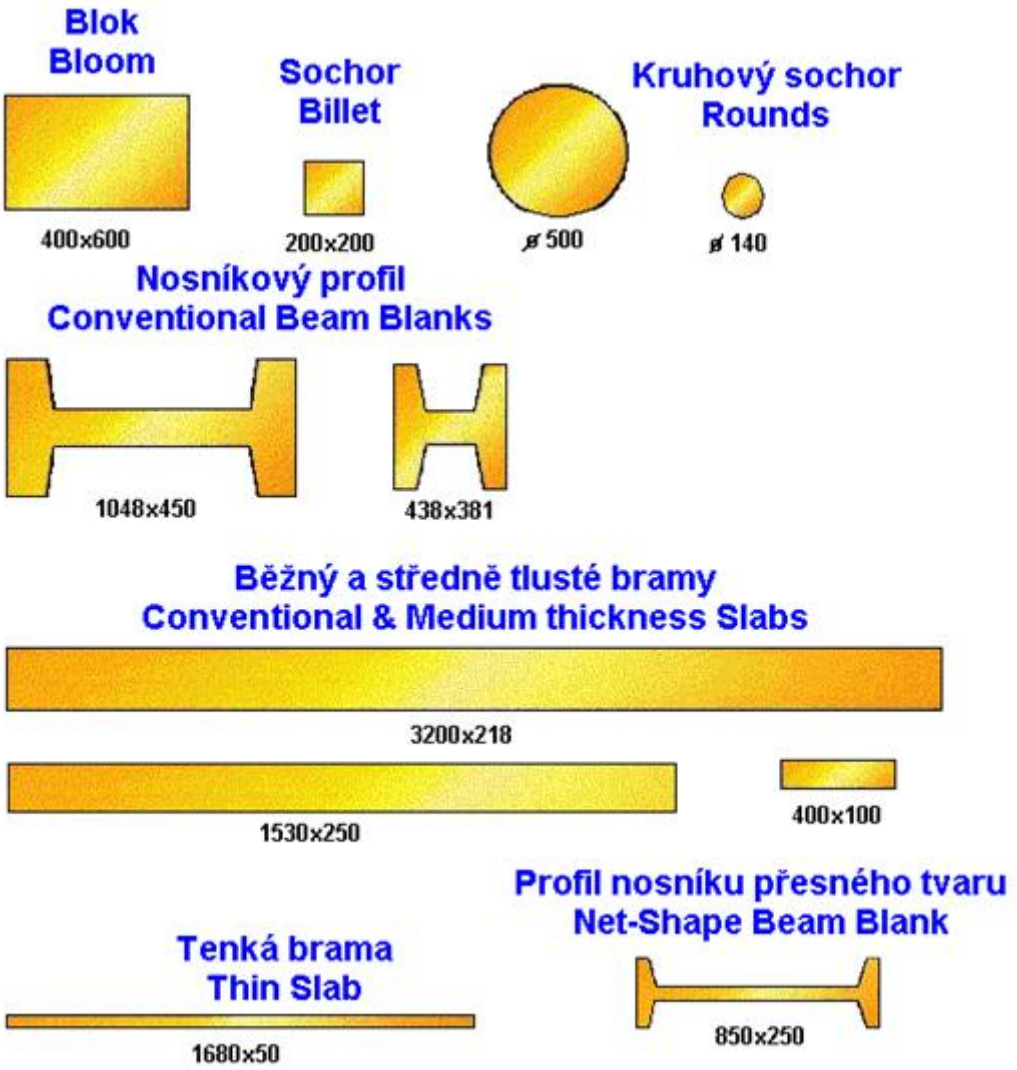
Po případné úpravě železa je pánev vložena do otočného revolverové držáku a z něj je železo dále přepravováno do nálevky (mezipánve). Ukázku přelévání zachycuje obr. 1.2. Z nálevky je železo několika otvory vypouštěno do krystalizátoru

(formy). Krystalizátor je vodou chlazená měděná forma. Samotné tuhnutí železa začíná zde a plynule pokračuje v sekundární chladící zóně. Železo prochází přes tažné válce a volitelně může být upravováno pomocí rovnacích válců. Ztuhlé železo se rozdělí v dělícím zařízení a pomocí dopravníků jsou železné polotovary přemisťovány do skladu nebo k dalšímu zpracování pomocí válcování.



Obr. 1.2 - Detail přelévání železa z pánve do nálevky

Hlavní odlišností mezi jednotlivými druhy odlévání jsou typy odlévaného profilu. Přehled nejběžnějších typů odlévaných profilů je uveden na obr. 1.3. Tato práce je zaměřena na odlévání (casting) sochorů, což ovšem nevylučuje použití dosažených výsledků s případnými úpravami i pro jiné profily.



Obr. 1.3 – Druhy odlévaných profilů

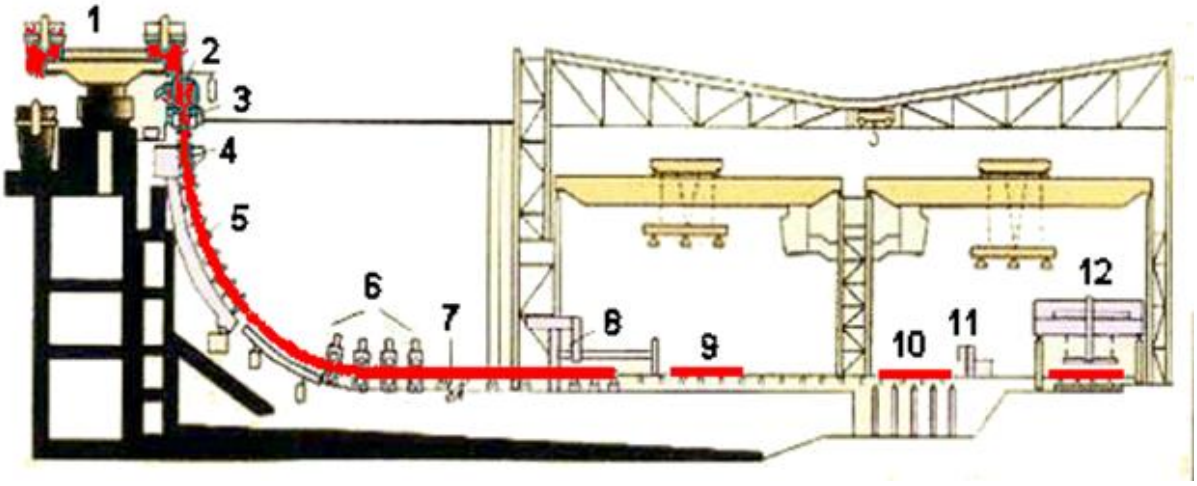
1.1. Technologický postup kontinuálního lití

Na začátku odlévání je spodní část formy utěsněn ocelovou zátkou. Zátka následně předchází odlévané železo přes celé zařízení na kontinuální lití. Jednotka tažných válců začne vytahovat zátku spolu s částečně ztuhlým předliskem. Do formy se musí doplňovat tekuté železo stejnou rychlostí jako je vytahováno pomocí tažných (withdraw) válců. Rychlost lití se liší v závislosti na tvaru odlévaného profilu, jeho velikosti a třídě jakosti železa. Obvyklá rychlost lití je v rozsahu 0,3 – 8 $m.min^{-1}$. Doba lití se pohybuje mezi 0,5 – 1,5 hodiny kvůli omezení tepelných ztrát v nálevce.

Z formy putuje odlévaný profil klecí sekundárního chlazení. V této oblasti získá profil výsledný tvar. Samotné chlazení je prováděno pomocí vody nebo vzduchu s vodou. Pokud se odlévají velké profily (např. bramy), musí být klec sekundárního chlazení opatřena tažnými válci a samotná klec musí být rozšířena. Zátka je oddělena od litého profilu po úplném ztuhnutí licího proudu a jeho projítí přes celou oblast tažných válců. Jakmile licí proud opustí klec sekundárního chlazení, je dělen na jednotlivé kusy odlévaných profilů – bramy, bloky, sochory, nosníky a válce.

1.2. Popis jednotlivých částí zařízení

Celý proces kontinuálního lití můžeme rozdělit podle jednotlivých částí – pánev, nálevka, primární chladící forma, sekundární chladící zóna a dělící mechanismus. Schéma zařízení pro kontinuální lití je znázorněno na obr. 1.4.



Obr. 1.4 – Schéma zařízení pro kontinuální lití

1-pánvová revolverová hlavice; 2-mezipánev; 3-krystalizátor (forma); 4-sekundární chlazení (primární sekce); 5-tažné zařízení+sekundární chlazení; 6-rovnací zařízení; 7-odpojení zaváděcí zátky; 8-dělící zařízení; 9-dopravní zařízení; 10-příčný dopravník; 11-značkovací zařízení; 12-skladovací zařízení

1.2.1. Revolverová hlavice a pánev

Revolverová hlavice (obr. 1.5) je na vrcholu zařízení pro kontinuální lití železa. Do této části je pomocí jeřábů přímo z pece nebo po případné technologické úpravě přesunuta pánev s roztaveným železem. Pánev slouží jako zásobník železa pro odlévání. Na spodku pánve je otvor (obr. 1.6), jehož polohu otevření lze regulovat. Tato poloha je nastavována pomocí PID regulátoru v závislosti na množství železa v nálevce, resp. na rychlosti samotného odlévání železa.

Obr. 1.5 – Revolverová hlavice

Obr. 1.6 – Spodní pohled na pánev a odlévací otvor

1.2.2. Nálevka

Nálevka (obr. 1.7) je nádoba obvykle obdélníkového tvaru (může být i ve tvaru T). Nad nálevkou je pouze revolverová hlavice s pánví. Železo je do nálevky přeléváno pomocí regulovatelného otvoru v pánvi. Hmotnost železa v nálevce se udržuje konstantní po celou dobu odlévání kvůli zajištění konstantní rychlosti odlévání. Na spodní straně nálevky jsou 4 nebo 6 otvorů. Detail přelévání železa z nálevky do formy pomocí 4 otvorů zachycuje obr. 1.8. Počet a pořadí otevřených otvorů může být libovolný a záleží na druhu odlévaného profilu a požadovaném

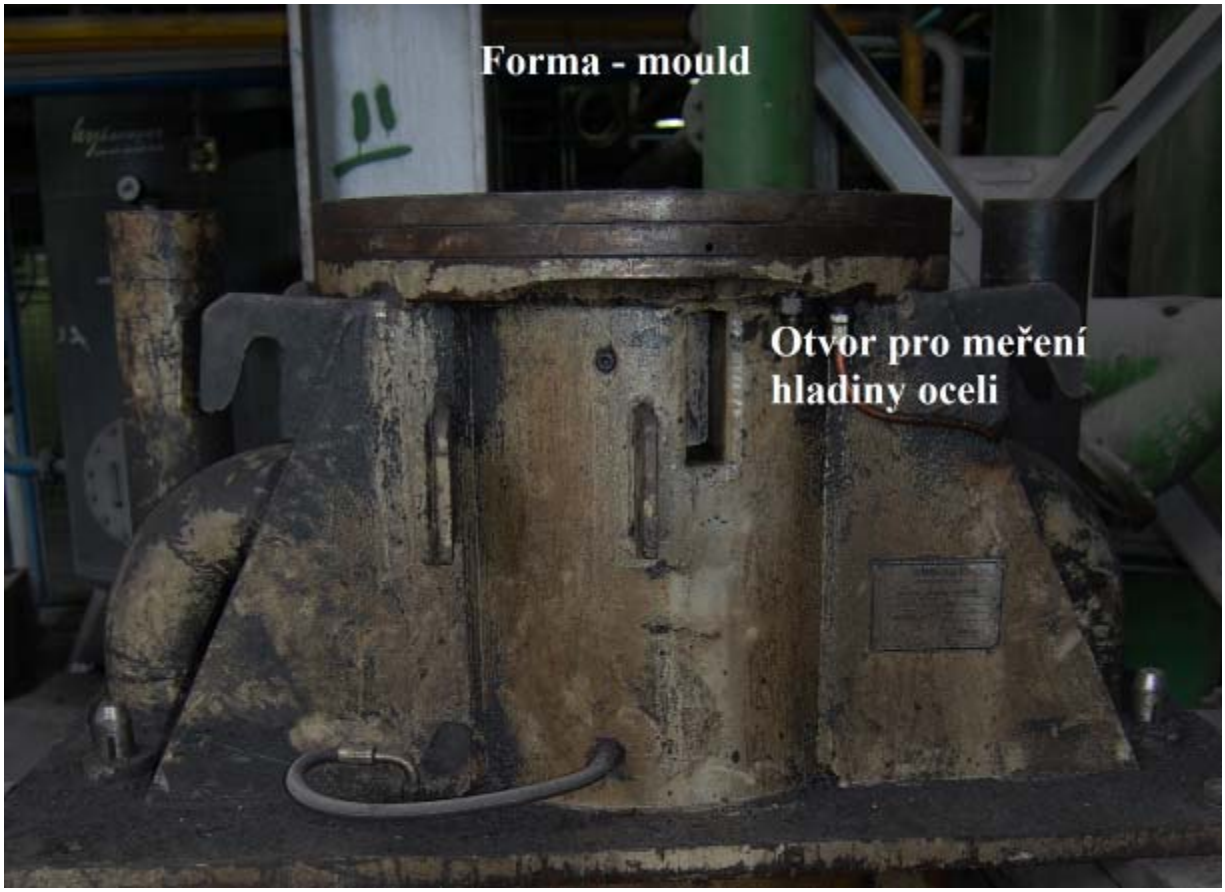
množství odlévaných profilů najednou. Mezi hlavní funkce nálevky patří separace oxidů, oddělení strusky a rozdělení licího toku.

Obr. 1.7 – Nálevka se čtyřmi odlévacími otvory

Obr. 1.8 – Detail přelévání železa z nálevky

1.2.3. Forma

Forma (obr 1.9) má za úkol upevnit ztuhlou skořepinu při vstupu tekutého jádra do sekundárního chlazení. U skořepiny je kladen důraz na tvar, tloušťku, neměnnou teplotu při posuvu a nepřítomnost povrchových vad a příměsí. Forma má tvar z obou stran otevřené krabice. Obsahuje chladící kanály z čisté měděné slitiny. Vnitřní stěny jsou pokoveny niklem nebo chrómem, aby nedocházelo k pronikání mědi do odlévaného železa. Ve formě je umístěn radioaktivní snímač měřící hladinu.



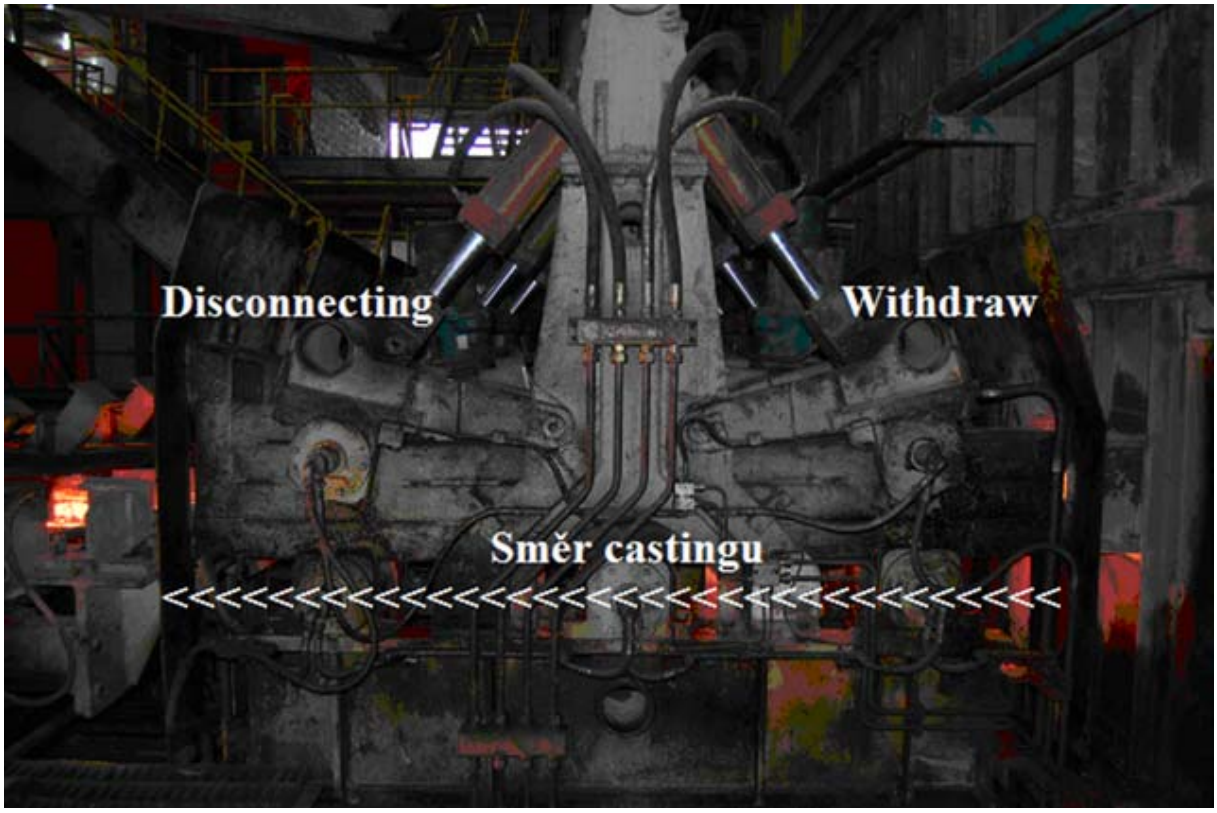
Obr. 1.9 – Forma

1.2.4. Sekundární chlazení

Z formy postupuje licí proud do zóny sekundárního chlazení, kde je ostřikován vodou. Intenzita a rovnoměrnost chlazení velmi výrazně ovlivňuje povrchovou a podpovrchovou kvalitu železa – vznik trhlin.

1.2.5. Oblast válců

Každý proud obsahuje skupiny válců (obr. 1.10) zajišťující posun tuhnoucího proudu a zároveň válcování jeho povrchu. Umístění válců a jejich průměr je volen tak, aby se minimalizoval vznik vyboulení proudu. Při odlévání bram jsou těsně pod formou jsou válce ze všech čtyř stran licího proudu, dále jsou již umístěny pouze podél. U odlévání sochorů jsou válce umístěny podél po celé délce licího proudu.



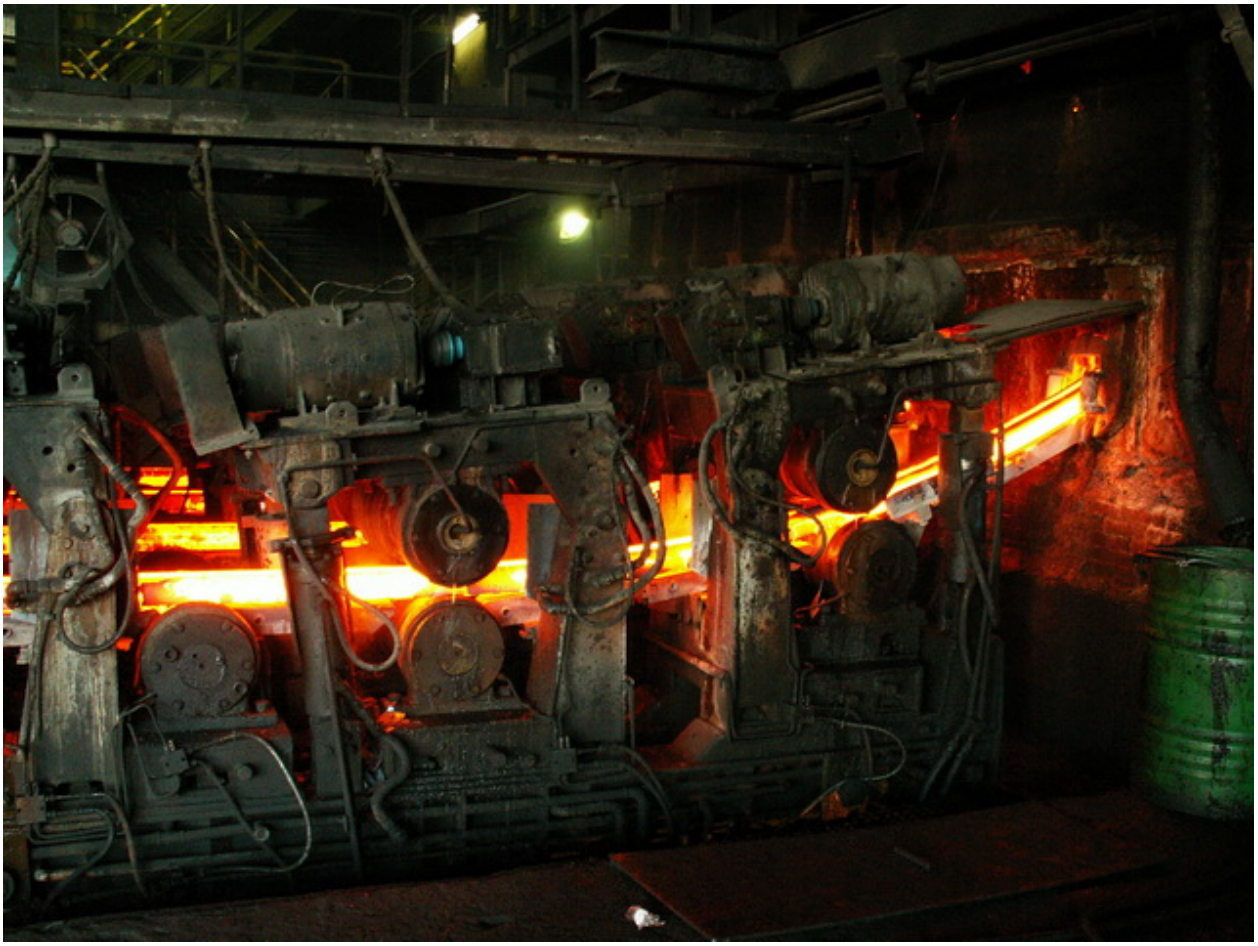
Obr. 1.10 – Pohled na válce posunující tuhnoucí proud

Withdraw – válce určující rychlost v průběhu odlévání

Disconnecting – válce zajišťující odpojení předlitku a následné rovnání proudu

1.2.6. Ohyb a rovnání

Tuhnoucí železo se musí ohýbat a rovnat, aby se potlačilo vnitřní pnutí, narovnala ztuhlá skořepina a udržel požadovaný tvar. K těmto účelům je zařízení na kontinuální lití vybaveno rovnacími válci (obr. 1.11).



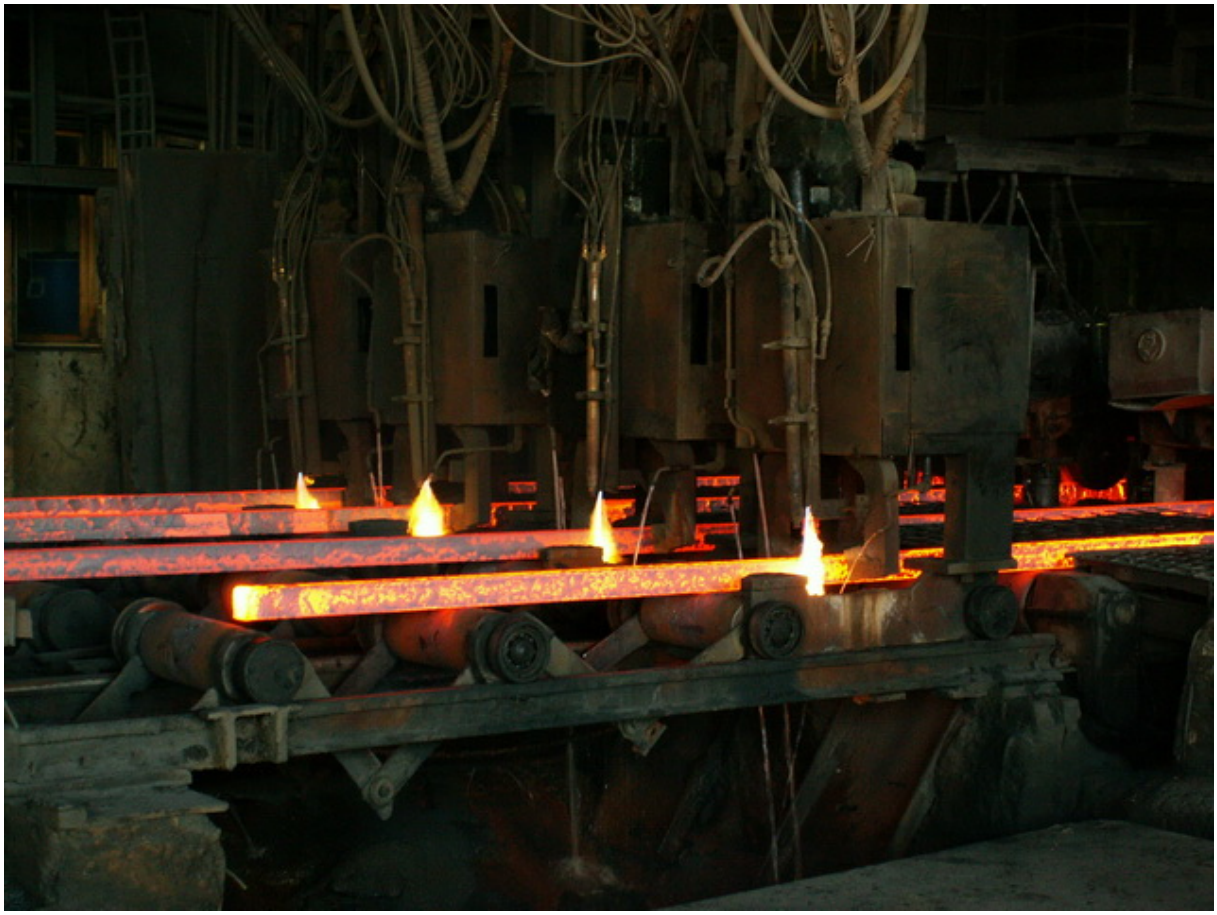
Obr. 1.11 – Rovnací válce

Obr. 1.12 – Pohled na licí proudy

Dummy bar – slouží k vytahování oceli z formy

1.2.7. Rovná část

V poslední části celého zařízení je po válečkovém dopravníku posouván odlévaný proud k dělícímu stroji. Řezání na požadovanou délku je prováděno mechanicky nebo kyslíkovým hořákem (obr. 1.13). Jednotlivé odlitky jsou následně označeny a přesunuty do skladu.



Obr. 1.13 – Řezání odlitků

2. Matematické a fyzikální modelování

Často se setkáme s nutností ověřit si zvolený postup, nastavení parametrů, …, avšak ve většině případů není možnost k tomuto ověření skutečné zařízení z různých důvodů použít – zařízení se teprve vyrábí, nachází se daleko, nelze zastavit výroba, mohlo by dojít k poškození zařízení, atd. Pro tyto případy je vhodné si vytvořit matematický nebo fyzikální model daného zařízení a otestovat potřebné věci na modelu.

2.1. Možnosti realizace modelů

Modely můžeme realizovat pomocí geometrické podobnosti a vytvořit identickou kopii zařízení v jiné velikosti nebo k danému zařízení přiřadit abstraktní model, který

popisuje průběh dějů v daném zařízení pomocí matematických popisů jejich průběhů. K sestavení modelu musíme přesně vymezit zkoumané jevy na daném zařízení a definovat sledované příznaky – definice systému na reálném objektu. Na tomto modelu jsme pak schopni sledovat průběhy fyzikálních veličin bez nutnosti realizace fyzického modelu. Abychom získali matematicko-fyzikální model, musíme jednotlivé průběhy sledovaných příznaků popsat vztahy vyjadřující závislosti změn daných příznaků. Takto získaný model sice vyjadřuje průběh sledovaných veličin, ale bez vyřešení matematického modelu nemá řešitel informace ve vhodné podobě pro správné vyhodnocení zkoumaného děje. Řešení těchto vztahů většinou provádíme pomocí vhodného simulačního programu, např. MathWorks Matlab a jeho součásti Simulink. V simulačním programu musíme nejdříve vytvořit simulační model odpovídající našemu matematicko-fyzikálnímu modelu. Tato realizace může být pomocí grafických prvků u blokově orientovaných simulačních programů nebo příkazové řádky simulačního programu.

2.2. Způsoby modelování

Způsoby modelování se liší podle kritéria přiřazení modelu k originálu. Vycházíme z podobnosti a analogie.

Podobnost představuje jednoznačné vzájemné přiřazení mezi různými systémy v jejich struktuře, vlastnostech a chování.

Fyzikální podobnost vyjadřuje podobnost mezi systémy a procesy stejné fyzikální podstaty a vedle geometrické podobnosti zahrnuje podobnost parametrů stavových veličin.

Matematická podobnost vyjadřuje podobnost mezi systémy a procesy mající stejný matematický popis.

Kybernetická podobnost vyjadřuje matematickou podobnost ve vnějším chování systémů. Na systém nahlížíme jako na černou skřínku tj. nemáme žádnou informaci o vnitřní struktuře ani vnitřních proměnných. Máme informaci pouze o vnějším chování.

Analogie vyjadřuje matematickou podobnost fyzikálně odlišných systémů.

2.3. Pojmy používané při modelování

Pojmem systém rozumíme množinu prvků a vazeb mezi nimi mající jako celek určité vlastnosti.

Okolí systému označuje množinu prvků, které nejsou prvky definovaného systému, ale mají k němu významné vazby.

Struktura systému zachycuje vnitřní uspořádání systému vyjádřeného pomocí vzájemných vazeb. Strukturu lze popsat různými způsoby, např. pomocí výčtu prvků systému a množinového zápisu, grafickým znázorněním struktury systému pomocí abstraktních symbolů nebo pomocí schematického znázornění struktury reálného systému.

Vazby rozdělujeme na vnitřní a vnější. Vnitřní vyjadřují vztahy mezi prvky uvnitř systému, vnější mezi prvky systému a jeho okolím. Jednotlivým vazbám odpovídá i označené systémových proměnných - vnitřní(stavové), vstupní, výstupní.

2.4. Postup při tvorbě modelu

Pokud vytváříme matematicko-fyzikální model, musíme nejprve definovat na zkoumaném zařízení systém, který bude postihovat námi zkoumané jevy. Sledované příznaky v modelu budou odpovídat výstupním, případně stavovým proměnným definovaného systému. Při samotné definici systému je důležité zajistit jeho separabilitu, tzn. systém svými výstupy nesmí ovlivňovat přes okolí svoje vstupy. Pokud nyní budeme měnit parametry modelu, můžeme analyzovat odezvy systému na dané podmínky a tím získat důležité poznatky o vlastnostech reálného zařízení, aniž bychom s ním skutečně pracovali.

3. Zařízení pro kontinuální odlévání železa

Tato práce je zaměřena na vytvoření matematicko-fyzikálního modelu zařízení pro kontinuální odlévání železa. Hlavním důvodem pro vytvoření modelu je možnost otestování nastavení regulátorů bez nutnosti být u zařízení a přerušení jeho provozu.

3.1. Mechanika tekutin

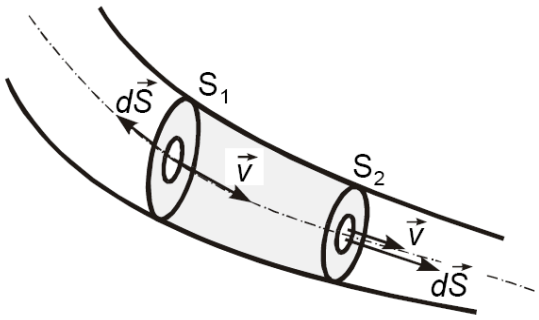
Při vytváření modelu kontinuálního lití železa potřebujeme popsat chování železa v jednotlivých částech zařízení. Popis chování nám poskytuje fyzikální obor mechanika, přesněji mechanika tekutin. Základní rovnice pohybu ideálních tekutin jsou rovnice kontinuity a Bernoulliho rovnice. Závislosti jednotlivých veličin budou odvozeny pomocí vztahů pro ideální kapalinu a pro reálnou kapalinu bude výsledek následně upraven příslušnými koeficienty.

Pohyb kapaliny lze vyjádřit pomocí spojitých neprotínajících se křivek nazývaných proudnice (proudové čáry). Proudnice mají směr tečny na směr rychlosti pohybu částice kapaliny.

3.1.1. Rovnice kontinuity

Vložíme-li do proudící kapaliny uzavřenou křivku, vytváří proudnice procházející body této křivky proudotrubici. Pláštěm této proudotrubice neprochází žádná proudnice, proto ani pláštěm neprotéká žádná částice kapaliny. Hmotnost kapaliny procházející každým průřezem proudotrubice je konstantní. Pro matematickou formulaci této závislosti je nutné definovat uzavřenou plochu S podle obr. 3.1 uzavírající objem V proudící kapaliny v části proudotrubice. Tok vektoru rychlosti **v** touto uzavřenou plochou je dán součtem toků všemi plochami, kterými kapalina protéká. Na obr. 3.1 kapalina vtéká plochou S_1 a vytéká plochou S_2. Tok touto uzavřenou plochou je tedy roven

$$\oiint_S \vec{v} \cdot d\vec{S} = \iint_{S_1} \vec{v} \cdot d\vec{S} + \iint_{S_2} \vec{v} \cdot d\vec{S} \,. \tag{1}$$



Obr. 3.1 – Tok vektoru plochy uzavřenou plochou

Tok plochou S_1 označujeme jako vtok a tok plochou S_2 jako výtok. Je-li vtok menší než výtok musí uvnitř objemu kapaliny uzavřeném plochou S ubýt množství kapaliny, které odpovídá rozdílu mezi výtokem a vtokem. Protože se hmotnost kapaliny zachovává, je hmotnost kapaliny vyteklé z objemu uzavřeného plochou S za jednotku času rovna úbytku hmotnosti kapaliny uvnitř tohoto objemu za jednotku času. Platí tedy:

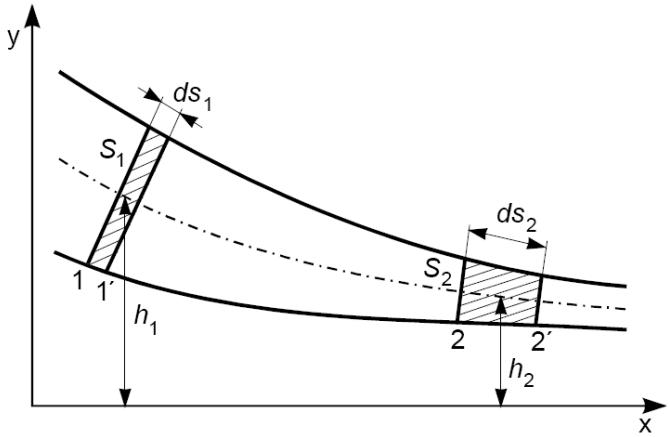
$$\oiint_S \rho\vec{v}\cdot d\vec{S} = -\frac{d}{dt}\iiint_V \rho dV\,, \tag{2}$$

kde ρ je hustota proudící kapaliny. Tuto rovnici nazýváme rovnicí kontinuity v integrálním tvaru. Pokud je hustota kapaliny konstantní, vytéká i vtéká kapaliny kolmo na plochu a rychlost je po celé ploše konstantní, pak můžeme zjednodušit rovnici (2). Zjednodušená rovnice má tvar

$$v\cdot S = konst. = Q\,. \tag{3}$$

3.1.2. Bernoulliho rovnice

Uvažujme ustálené proudění ideální kapaliny v trubici o nestejném průřezu (obr. 3.2). Trubice je vymezena dvěma proudnicemi. Na kapalinu působí tíhová a tlaková síla, které konají práci.



Obr. 3.2 – Bernoulliho rovnice - potrubí

Jejich vykonaná práce se projeví ve změně kinetické energie kapaliny. Uvažujme kapalinu v určitém časovém okamžiku mezi průřezy trubice S_1 a S_2 podle

obr. 3.2. V místě průřezu S_1 je tlak p_1, v místě průřezu S_2 je tlak p_2 a platí $p_1 > p_2$. Za čas dt se kapalina posune o ds_1 v průřezu S_1 resp. o ds_2 v průřezu S_2. Jelikož se jedná o ideální kapalinu musí platit rovnost elementárních objemů dV kapaliny.

$$ds_1 \cdot S_1 = ds_2 \cdot S_2 = dV \tag{4}$$

Jelikož se zabýváme stacionárním prouděním, nemění se potenciální ani kinetická energie mezi řezy 1´ a 2. Pro přírůstek kinetické energie objemového elementu dV můžeme napsat rovnici

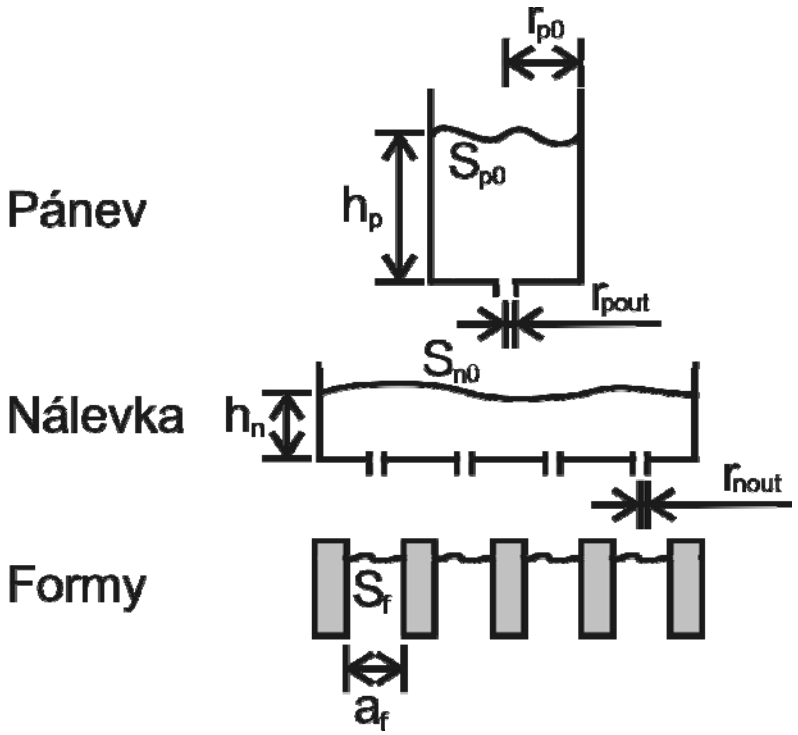
$$\frac{1}{2}\rho dV v_2^2 - \frac{1}{2}\rho dV v_1^2 = p ds_1 S_1 - p ds_2 S_2 + \rho g dV (h_1 - h_2)\,. \tag{5}$$

Podělíme-li rovnici (5) objemem kapaliny dV, dostaneme rovnici vyjadřující zákon zachování mechanické energie pro jednotkový objem kapaliny tj. Bernoulliho rovnici.

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g h + p = konst. \tag{6}$$

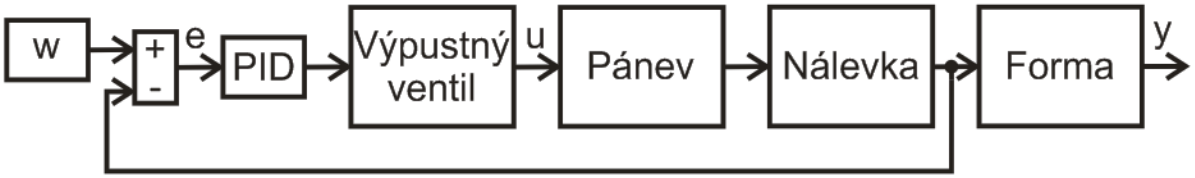
3.2. Parametry zařízení

Abychom mohli vytvořit model tohoto zařízení, musíme nejprve stanovit proměnné a popsat vztahy mezi nimi. Zařízení pro kontinuální odlévání železa lze přirovnat k pohybu kapaliny v několika nádobách – pánev, nálevka, forma. Konkrétní hodnoty parametrů jsou použity ze zařízení pro kontinuální odlévání železa ve firmě Insig ve městě Ahwaz v Iránu. Schematické znázornění tohoto uspořádání je na obr. 3.3. Vstupem do systému je množství železa v pánvi a počáteční množství železa v nálevce. Výstupem je množství železa v nálevce, resp. rychlost pohybu železa ve formě. Další parametry (stavové proměnné, konstanty, …) pro toto zařízení jsou uvedeny níže.



Obr. 3.3 – Schématické znázornění kontinuálního odlévání

Jelikož hlavním účelem vytvoření tohoto modelu kontinuálního odlévání železa je možnost navrhování a testování parametrů PID regulátorů pro zařízení tohoto typu, je model doplněn o blok PID regulátoru, blok statické převodní charakteristiky výpustného ventilu pánve a zpětnou vazbu. Blokové schéma výsledného modelu je znázorněno na obr. 3.4.



Obr. 3.4 – Blokové schéma modelu kontinuálního odlévání železa

w – žádaná hodnota, e – regulační odchylka,
u – vstup do systému, y – výstup systému

3.2.1. Pánev

Pánev je nádoba, ve které se dopravuje roztavené železo do zařízení. Jedná se o válcovou nádobu o poloměru r_{p0} =1 m. Počáteční množství železa v pánvi je m_{p0}. Obvyklé počáteční množství oceli je m_{p0} = 50000 kg. Hustota železa při odlévací teplotě 1600°C je ρ = 7014 kg.m^3. Počáteční výška hladiny železa je přímo úměrná hmotnosti železa, což pro 50000 kg odpovídá výšce h_{p0} = 2,3 m. Na dně nádoby je plynule regulovatelný výpustný ventil s maximálním poloměrem r_{pout} = 0,0275 m.

Všechny potřebné parametry pánve jsou shrnuty v následující tabulce:

Název veličiny	**Značka**	**Jednotka**	**Hodnota**
poloměr pánve	r_{p0}	m	1
počáteční hmotnost železa v pánvi	m_{p0}	kg	50000
maximální poloměr výpustného ventilu	r_{pout}	m	0,0275
počáteční výška hladiny	h_{p0}	m	2,3
výška hladiny železa v pánvi	$h_p(t)$	m	-
hmotnost železa v pánvi	$m_p(t)$	kg	-
povrch otevření ventilu	$S_{pout}(t)$	m^2	-
výtoková rychlost železa	$v_{pout}(t)$	m.s^{-1}	-
objemový průtok v místě výpustného ventilu	$Q_{pout}(t)$	m^3.s^{-1}	-

3.2.2. Nálevka

Z pánve vytéká železo do nádoby ve tvaru kvádru. Vnitřní obsah podstavy je S_{n0} = 3 m^2. Počáteční hmotnost železa v nálevce je m_{n0} = 3000 kg. Na dně je několik otvorů podle použitého typu nálevky a druhu odlévaného profilu. Poloměr každého výpustného otvoru je r_n = 0,009 m. Jednotlivé otvory lze uzavřít a tím upravovat počet odlévacích proudů N. Samotné zařízení je navrženo tak, aby zajistilo konstantní hmotnost železa v nálevce.

Všechny potřebné parametry nálevky jsou shrnuty v následující tabulce:

Název veličiny	Značka	Jednotka	Hodnota
vnitřní obsah podstavy nálevky	S_{n0}	m^2	3
počáteční hmotnost železa v nálevce	m_{n0}	kg	3000
poloměr výpustného ventilu	r_{nout}	m	0,009
počáteční výška hladiny	h_{n0}	m	0,14
požadovaná výška hladiny	h_{nw}	m	0,19
výška hladiny železa v nálevce	$h_n(t)$	m	-
hmotnost železa v nálevce	$m_n(t)$	kg	-
celkový obsah otevřených výpustných otvorů	S_{nout}	m^2	-
výtoková rychlost železa pro S_{nout}	$v_{nout}(t)$	$m.s^{-1}$	-
objemový průtok výpustných ventilů pro S_{nout}	$Q_{nout}(t)$	$m^3.s^{-1}$	-
počet odlévacích proudů	N	-	-

3.2.3. Forma

Do forem odtéká železo z nálevky a vytváří výsledný tvar železa. V našem případě při odlévání sochorů o velikosti 10x10 má forma čtvercový vnitřní průřez o rozměrech a_f = 0,1 m. Rychlost pohybu železa ve formě je přibližně v_f = 0,05 $m.s^{-1}$.

Název veličiny	Značka	Jednotka	Hodnota
hrana formy	a_f	m	0,1
vnitřní povrch jednotlivých forem	S_f	m^2	0,01
výtoková rychlost železa	$v_f(t)$	$m.s^{-1}$	0,05

3.3. Popis vztahů mezi veličinami

Pomocí rovnice kontinuity (3) a Bernoulliho rovnice (6) a popíšeme závislost výstupní rychlosti z pánve a nálevky. Závislosti odvodíme pro ideální kapalinu a výsledek poté pomocí ztrátových koeficientů upravíme pro reálnou kapalinu.

3.3.1. Ideální kapalina – pánev

Nejprve napíšeme rovnice (3) a (6) pro náš případ železa v pánvi pro dva průřezy, a to pro volnou hladinu ve výšce h_p a výtokový otvor.

$$S_{p0} v_{p0} = S_{pout} v_{pout} \tag{7}$$

$$\frac{v_{p0}^2}{2g} + h_p + \frac{p_a}{\rho g} = \frac{v_{pout}^2}{2g} + 0 + \frac{p_a}{\rho g} \tag{8}$$

Jelikož má pánev tvar válce bez horní podstavy a kapalina vytéká do volného prostoru, jsou tlaky na obou stranách rovnice rovny atmosférickému a tyto členy se odečtou. Z rovnice (7) vyjádříme veličinu v_{p0}, dosadíme do rovnice (8) a získáme následující vztah.

$$\frac{v_{pout}^2 S_{pout}^2}{S_{p0}^2} + 2gh_p = v_{pout}^2 \tag{9}$$

Dalšími úpravami dostaneme vztah pro výtokovou rychlost z pánve v závislosti na h_p.

$$v_{pout} = \sqrt{\frac{2gh_p}{1 - \frac{S_{pout}^2}{S_{p0}^2}}} \tag{10}$$

Závislost změny h_p na čase určíme pomocí průtoku a změny objemu.

$$Q_{pout} = \frac{dV}{dt} \tag{11}$$

$$\frac{dV}{dt} = S_{p0} \frac{dh}{dt} \tag{12}$$

$$\frac{dh_p}{dt} = S_{p0} Q_{pout} \tag{13}$$

Po integraci rovnice (12) získáme vztah pro h_p.

$$h_p = h_{p0} - \frac{Q_{pout} \cdot t}{S_{p0}} \tag{14}$$

Okamžitý průtok v místě výpustného ventilu vyjádříme následující rovnicí.

$$Q_{pout} = S_{pout} v_{pout} \tag{15}$$

3.3.2. Ztrátové koeficienty

V praxi se používají nejčastěji tyto koeficienty: ztrátový koeficient ξ, rychlostní součinitel φ, Coriolisovo číslo α, součinitel kontrakce α (pro odlišení použit symbol ε) a výtokový součinitel μ. Jejich hodnoty jsou uvedeny v tabulkách, případně je nutné je změřit pro konkrétní aplikaci.

Ztrátový koeficient ξ vyjadřuje ztráty způsobené vznikem vířivých proudů, třením a další energetické ztráty. Je závislý na tvaru, uspořádání a velikosti výtokového otvoru a Reynoldsově čísle.

Rychlostní součinitel φ vyjadřuje poměr mezi velikostí skutečné a teoretické rychlosti ve výtokovém otvoru.

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta}} \tag{16}$$

Coriolisovo číslo α upravuje výpočet střední rychlosti pohybu částic. Pro malé rychlosti se tento koeficient zanedbává (α = 1)

Součinitel kontrakce ε udává poměr mezi skutečným průřezem výtokového proudu kapaliny a průřezu výtokového ventilu.

Výtokový součinitel μ upravuje výtokovou rychlost v závislosti na součiniteli kontrakce a rychlostním součiniteli.

$$\mu = \varepsilon\varphi \tag{17}$$

3.3.3. Reálná kapalina - pánev

Pomocí výše uvedených koeficientů upravíme předchozí vztahy (10) a (15) a získáme závislosti pro reálnou kapalinu.

$$v_{pout} = \varphi_p \sqrt{\frac{2gh_p}{1 - \frac{S_{pout}^2}{S_{p0}^2}}}\text{, kde } \varphi_p = \frac{1}{\sqrt{\alpha_p + \zeta_p}} \tag{18}$$

$$Q_{pout} = \varepsilon_P S_{pout} v_{pout}\text{, kde } \varepsilon = \frac{S_{poutskut}}{S_{pout}} \tag{19}$$

3.3.4. Reálná kapalina - nálevka

Stejné vztahy pouze se změnou označení veličin použijeme pro popis chování železa v nálevce. Jelikož do nálevky oproti pánvi železo přitéká, vyjádříme časovou závislost výšky hladiny jako rozdíl objemového průtoku vtoku a výtoku. Průřez S_{nout} je v následujících vztazích součtem průřezů všech právě otevřených výtokových ventilů.

$$v_{nout} = \varphi_n \sqrt{\frac{2gh_n}{1 - \frac{S_{nout}^2}{S_{n0}^2}}} \tag{20}$$

$$Q_{nout} = \varepsilon_n S_{nout} v_{nout}\text{, kde } \varepsilon = \frac{S_{noutskut}}{S_{nout}} \tag{21}$$

$$\frac{dh_p}{dt} = S_{p0} Q_{pout} \tag{22}$$

$$h_n = h_{n0} - \frac{Q_{nout} \cdot t}{S_{n0}} \tag{23}$$

3.3.5. Reálná kapalina - forma

Železo z nálevky podle počtu otevřených výtokových otvorů vytéká do stejného počtu forem. Rychlost pohybu železa v těchto formách je vyjádřena pomocí okamžitého objemové průtoku a průřezu forem.

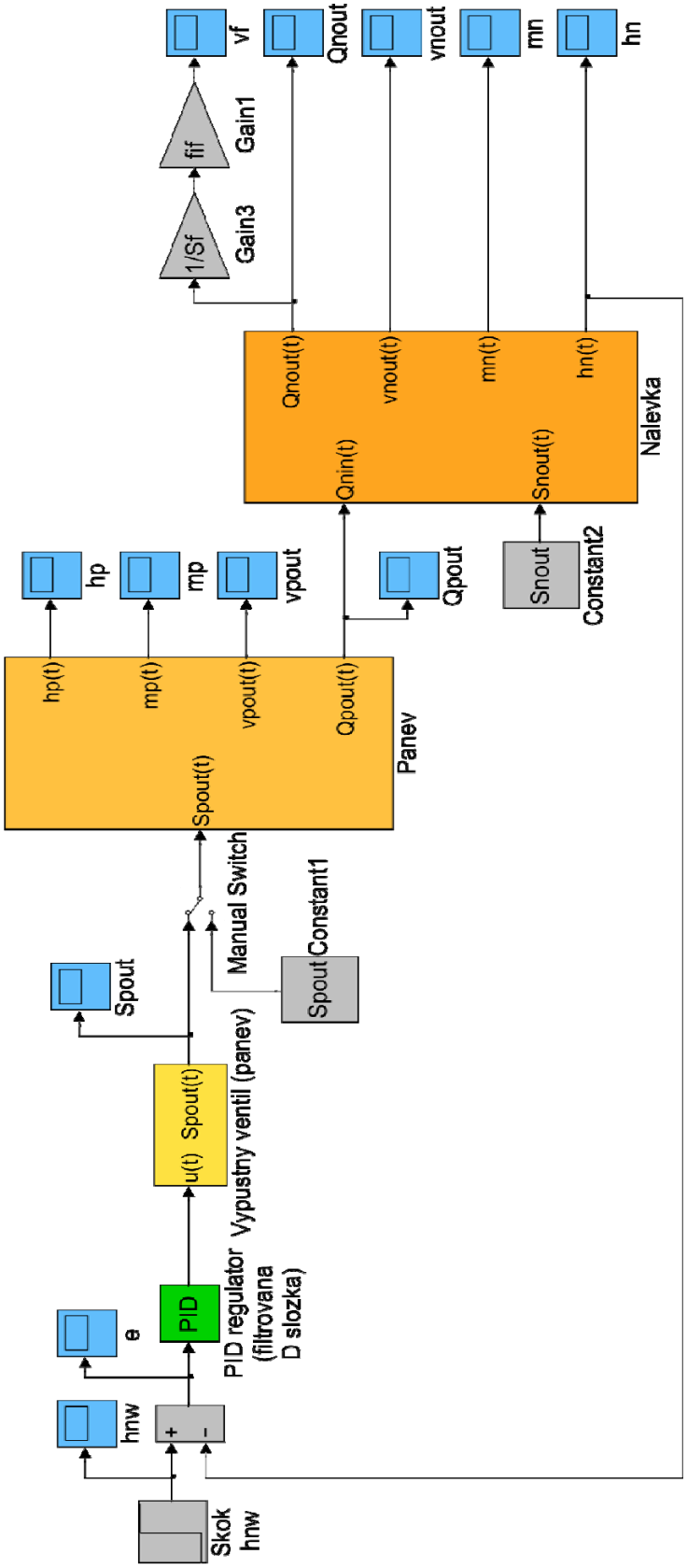
$$v_f = \varphi_f Q_{nout} S_f \tag{24}$$

3.4. Realizace modelu – Simulink

Pro realizaci modelu byl zvolen počítačový program Matlab a jeho součást Simulink od firmy Mathworks. Matlab umožňuje realizovat složité výpočty pomocí velmi přesných numerických metod.

Simulink poskytuje grafické prostředí a uživatelsky modifikovatelnou knihovnu bloků, čím se stává velmi vhodným produktem pro vytváření a testování modelů reálných systémů.

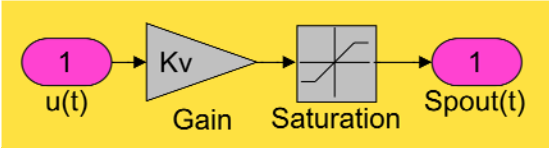
Simulační schéma tohoto modelu vytvořeného v programu Simulink je zobrazeno na obr. 3.5.



Obr. 3.5 – Simulační schéma modelu kontinuálního odlévání železa

Jednotlivé proměnné jsou získávány z pracovního prostoru (workspace) v programu Matlab. Do workspace se konstanty načítají pomocí zavolání souboru parametry.m. Struktura toho souboru je zobrazena v příloze. Jména proměnných odpovídají označení veličin uvedenému v kapitole 3.2.

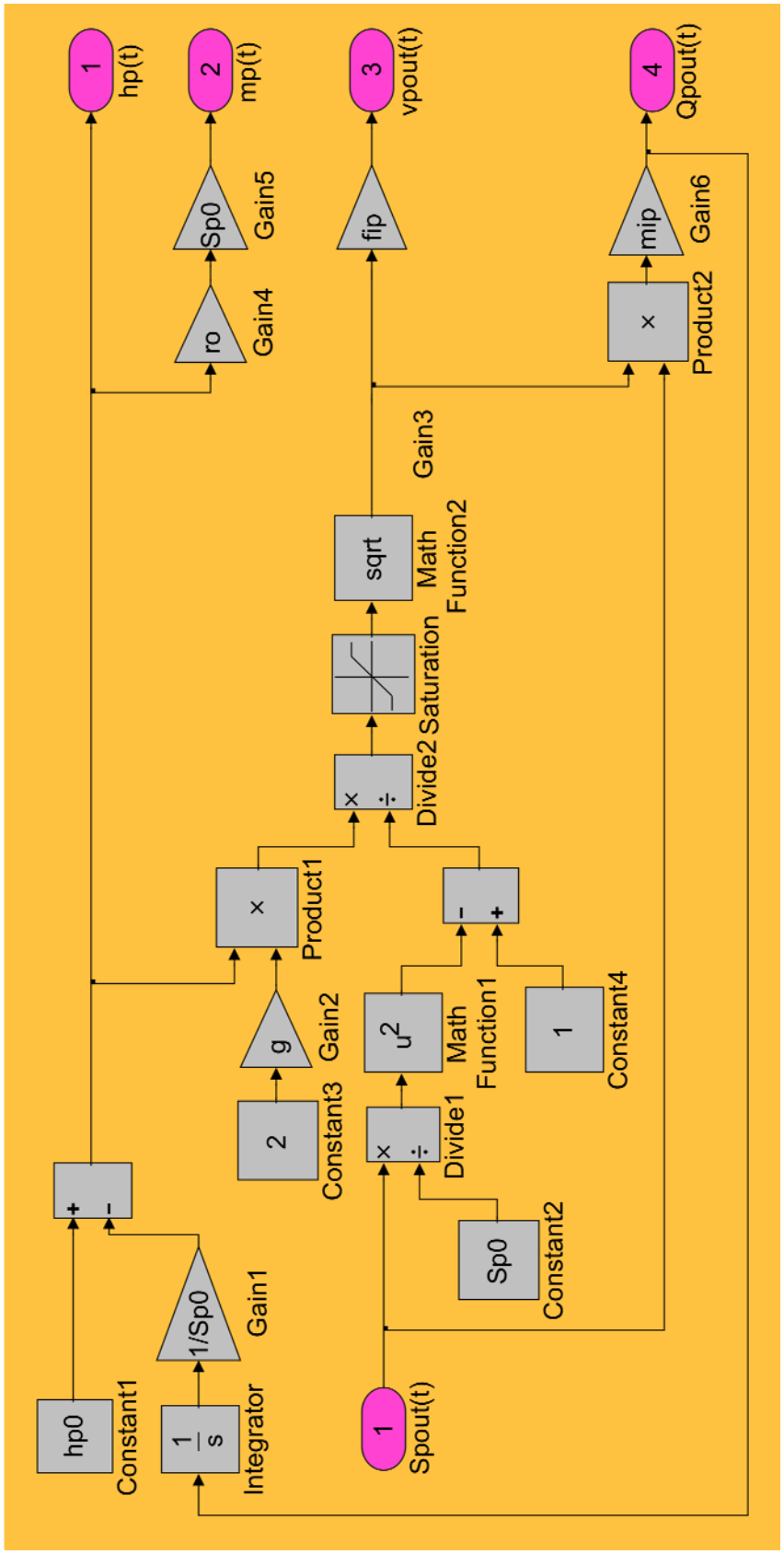
Vstupem do soustavy je požadovaná hodnota výšky hladiny železa v nálevce resp. hmotnost železa v ní. Regulační odchylka je získána jako rozdíl žádané a aktuální hodnoty a je vstupem do PID regulátoru, který na základě zvolených parametrů zareaguje. Regulační zásah (výstup z bloku PID) je převáděn na odpovídající otevření výpustného ventilu pánve. V reálu je tato část realizována pomocí elektromotoru nebo hydraulických členů. Jelikož se nepodařilo sehnat konkrétní statickou převodní charakteristiku tohoto členu, byla pro účely ověřování modelu zvolena lineární závislost respektující fyzické možnosti ventilu (maximální a minimální otevření). Struktura tohoto bloku je na obr. 3.6.



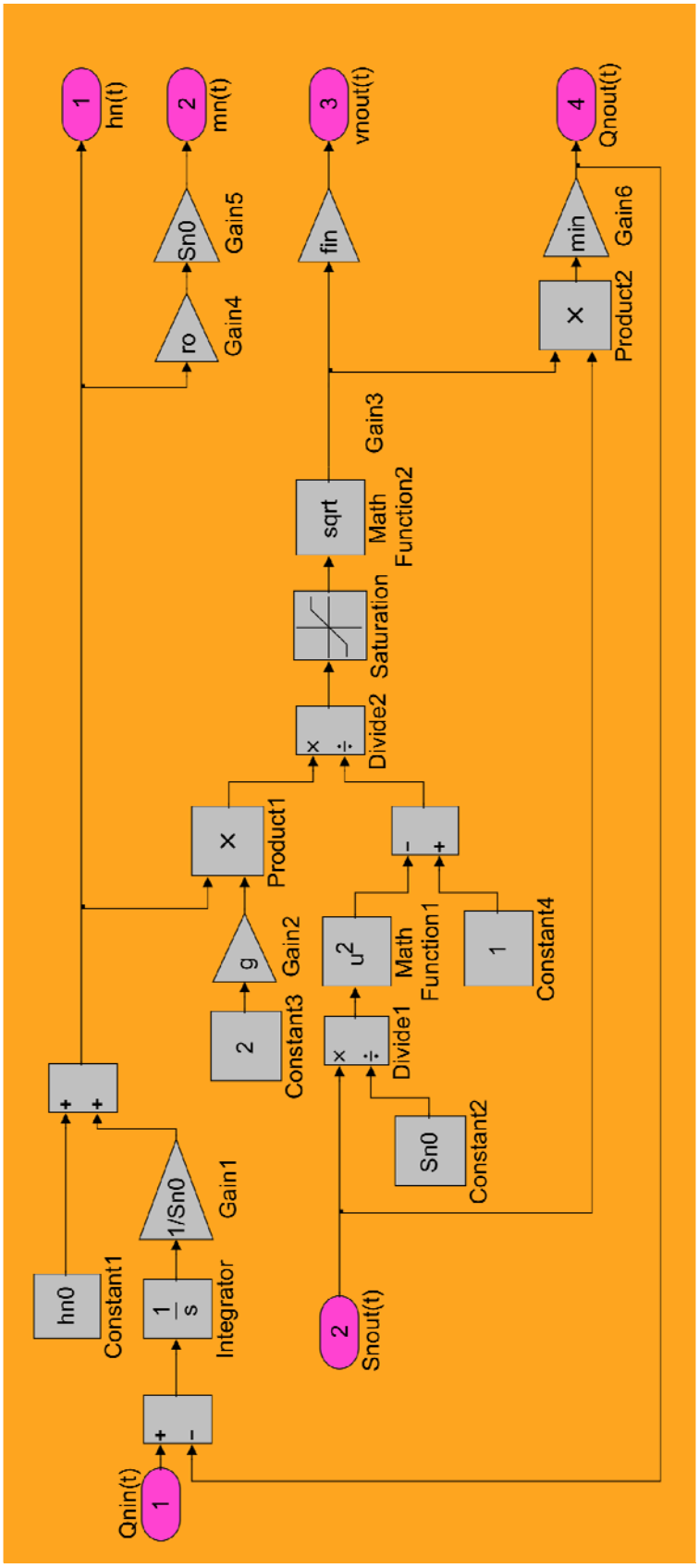
Obr. 3.6 – Blok: Výpustný ventil (pánev)

Bloky popisující pohyb železa z pánve do nálevky resp. z nálevky do formy jsou si navzájem podobné. Liší se ve výpočtu aktuální výšky hladiny železa v nádobách. Jelikož do pánve žádné železo nepřitéká, je aktuální výška hladiny závislá pouze na velikosti objemového průtoku výtoku, naproti tomu u pánve na rozdílu objemového průtoku přítoku a výtoku. Simulační schémata pro pánev resp. nálevku jsou zobrazena na obr. 3.7 resp. obr. 3.8.

Z nálevky odtéká železo do jednotlivých forem. Rychlost pohybu železa v těchto formách je přímo úměrná množství, které do nich přiteče a nepřímo úměrná jejich průřezu.



Obr. 3.7 – Blok: Pánev

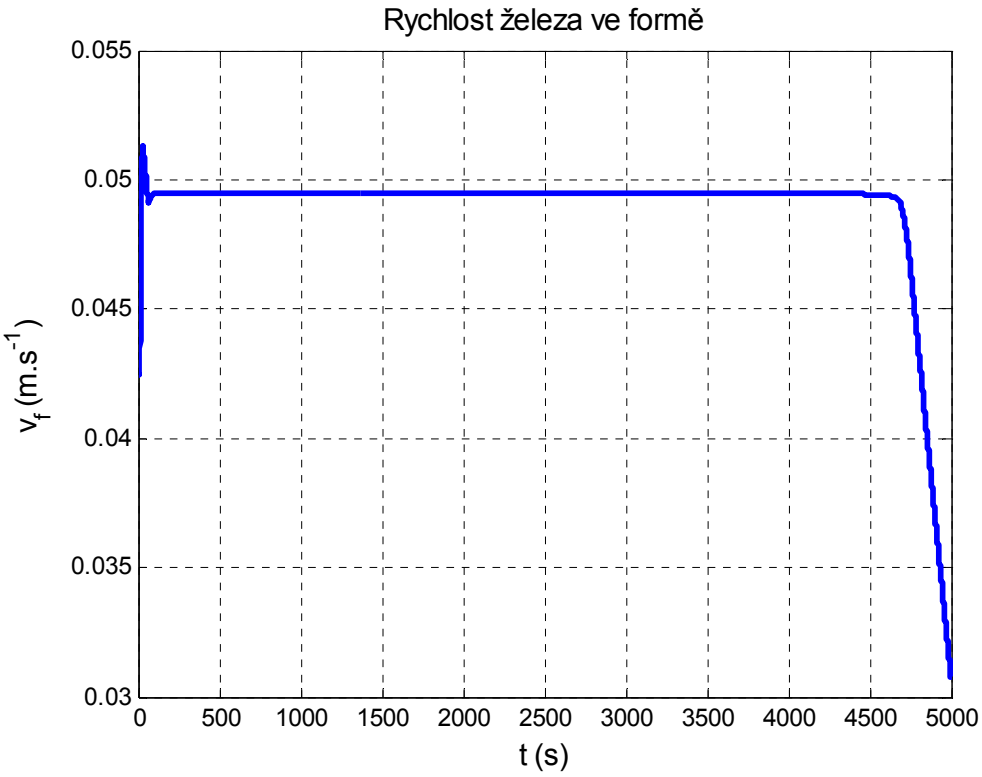


Obr. 3.8 – Blok: Nálevka

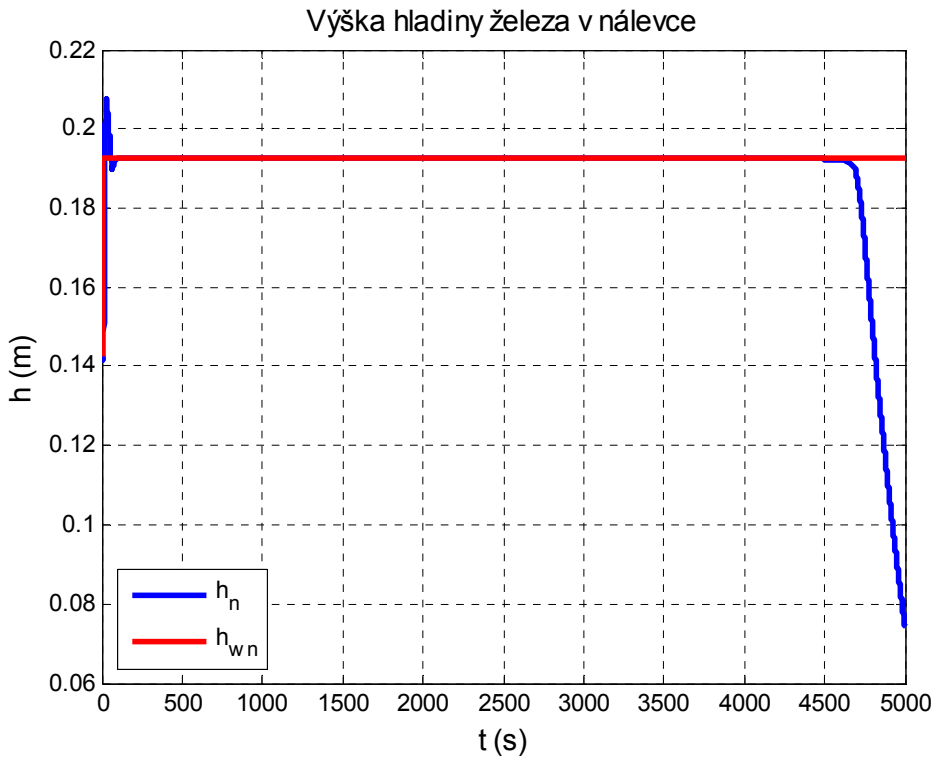
4. Testování modelu

Jelikož není možné z finančních a technických důvodů provést měření se stejnými parametry a nastaveními na skutečném zařízení v Ahwazu, jsou uvedeny výsledky pouze simulací.

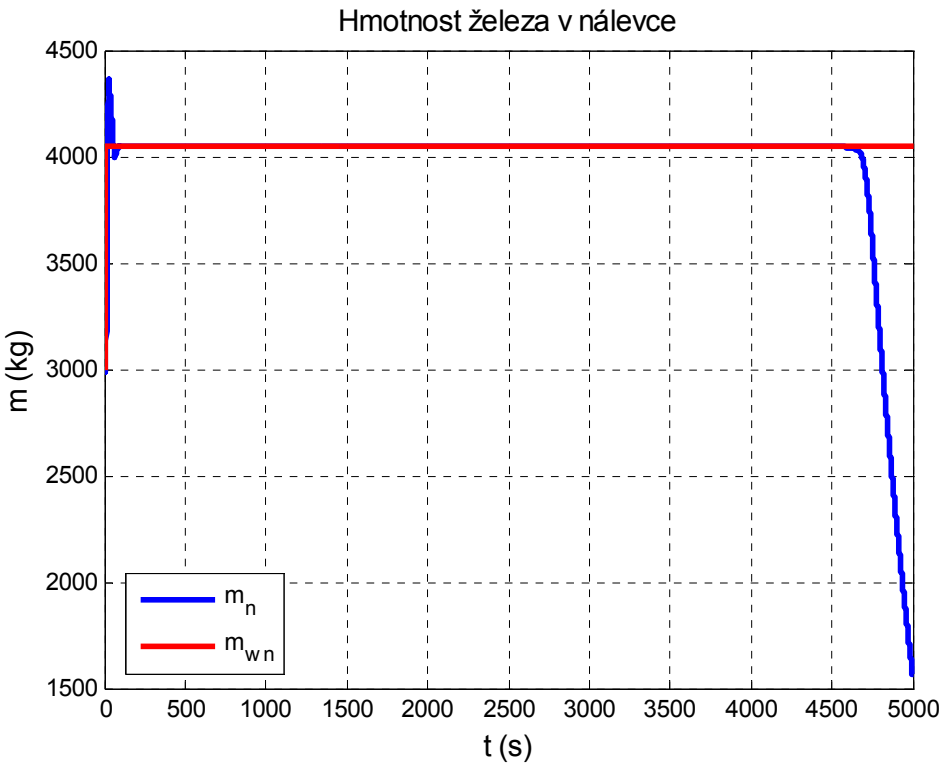
Protože je model vytvářen za účelem testovaní parametrů PID regulátoru, jsou provedeny tyto simulace se zapojeným PID regulátorem a požadovanou hmotností železa v nálevce 4050 kg (odpovídající výška hladiny železa v nálevce 0,193 m). Celkové množství železa v zařízení před spuštěním je 53000 kg. Regulátor spolehlivě pracuje pouze v okolí požadované hodnoty a proto je uvažována situace s počátečním množstvím 50000 kg železa v pánvi a 3000 kg v nálevce (odpovídá skutečnému provozu).



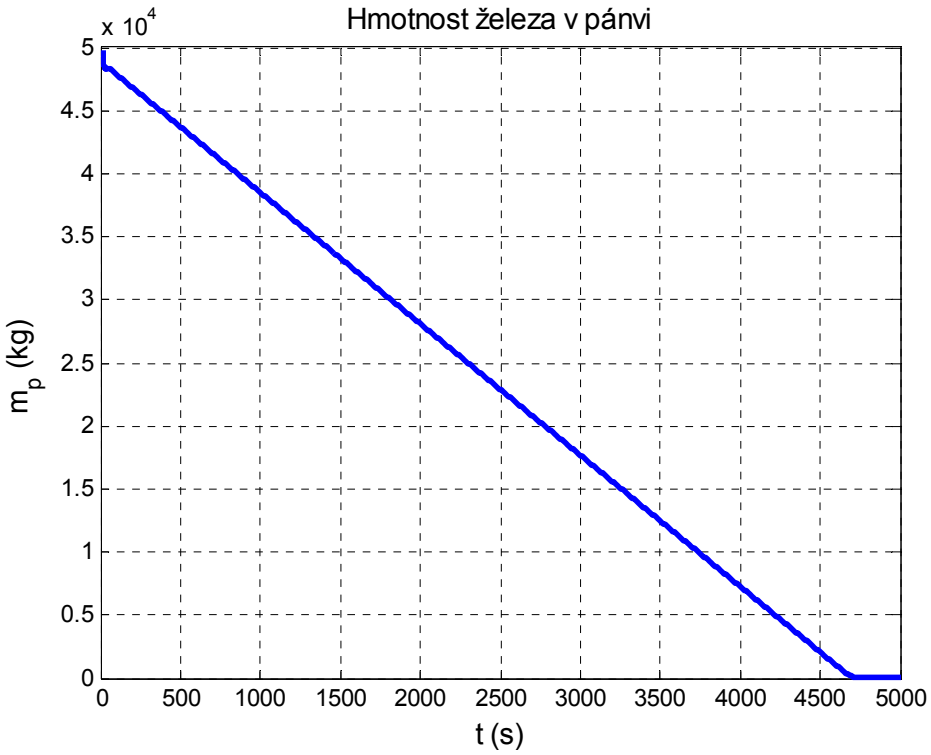
Obr. 4.1 – Závislost rychlosti pohybu železa ve formě na čase



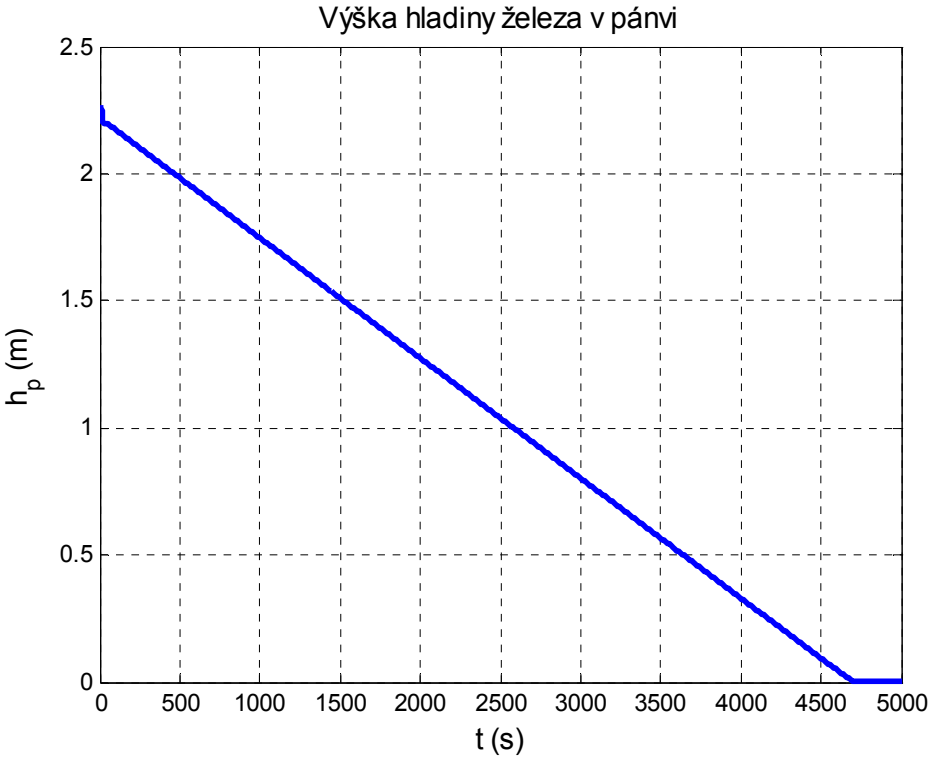
Obr. 4.2 – Závislost výšky hladiny železa v nálevce na čase



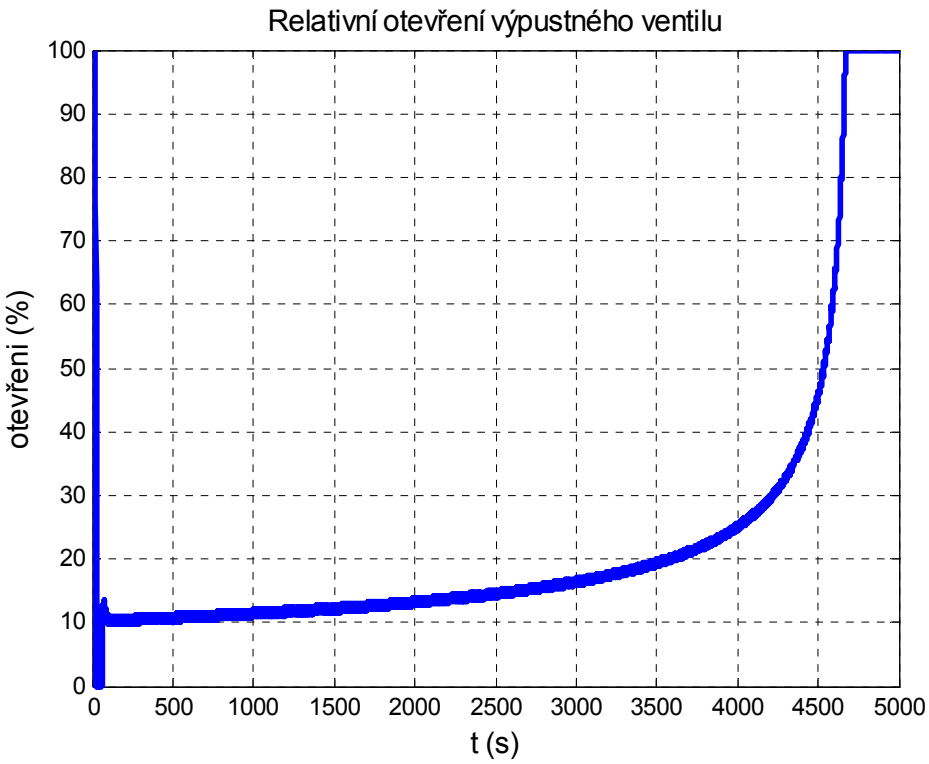
Obr. 4.3 – Závislost hmotnosti železa v nálevce na čase



Obr. 4.4 – Závislost hmotnosti železa v pánvi na čase



Obr. 4.5 – Závislost výšky hladiny železa v pánvi na čase



Obr. 4.6 – Závislost otevření výpustného ventilu v pánvi na čase

Podle provedených měření lze usoudit, že vytvořený model dobře odpovídá reálnému. Rychlost železa ve formě odpovídá velmi dobře požadované hodnotě 0,05 $m.s^{-1}$ u reálného zařízení. Také doba výtoku 50000 kg železa z pánve časově odpovídá reálnému zařízení. V případě simulace je tato doba přibližně 1 h 18 minut. Při měření na skutečném zařízení byla zjištěna doba 1 h 20 minut se stejnou lineární závislostí hmotnosti železa v pánvi na čase.

5. Závěr

Hlavním cílem této práce bylo nalézt model zařízení pro kontinuální odlévání železa, který bude v budoucnu využit pro návrh a testování regulátorů řídících rychlost odlévání železa. Získaný model lze snadno upravit pro konkrétní zařízení. Při použití v praxi bude nutné zjistit od výrobce nebo změřit statickou převodní charakteristiku výtokového ventilu v pánvi a ostatní parametry zařízení. Podle zjištěné převodní charakteristiky je nutné upravit blok Výpustný ventil (pánev) a do

konfiguračního souboru parametry.m zapsat všechny potřebné parametry a případné ztrátové koeficienty.

Nalezený model nebyl podroben přesnému porovnání s reálným systémem z finančních a technických důvodu. Modelované zařízení je nasazeno v provozu ve firmě Insig v Iránu a je neustále využíváno, proto nebylo možné provést měření na skutečném zařízení se stejnými podmínkami. Hodnoty hlavních výstupních parametrů – množství železa v pánvi a nálevce, rychlost pohybu železa ve formě a doba výtoku definovaného množství železa – při srovnání nalezeného modelu s reálným zařízením si navzájem odpovídají.

Použití tohoto modelu v praxi přinese finanční úspory díky navržení a otestování funkce regulátoru na pracovišti bez nutnosti provádět nákladné testy na stavbách.

Dalším krokem k ušetření nákladů a vylepšení možností testování je zakomponování získaného modelu do simulátoru, který bude přímo schopen komunikovat s programovatelnými automaty (primárně Simatic řady S7-300 a S7-400 od firmy Siemens) používaných při řízení reálného provozu.

Seznam literatury

[1] BRDIČKA M., SAMEK L., SOPKO, B., *Mechanika kontinua,* Praha, Academia, 2005.

[2] KUBEŠ P., KYNCL Z., *Fyzika I,* Praha, Vydavatelství ČVUT, 1999.

[3] VLK V., *Fyzikální modelování pochodů při plynulém odlévání oceli,* Ostrava, VŠB – Technická univerzita Ostrava, dizerzační práce, 2001.

[4] KAČMÁŘ D., *Mould level control during continous steel casting,* Ostrava, VŠB – Technická univerzita Ostrava, dizerzační práce, 1997.

[5] ŠTĚTINA J., *Dynamický model teplotního pole plynule odlévané bramy* ⟨http://ottp.fme.vutbr.cz/users/stetina/disertace/index.htm⟩, Ostrava, VŠB – Technická univerzita Ostrava, dizerzační práce, 2007.

[6] HOFMANN J., URBANOVÁ M., *Fyzika I. verze 1.0 (elektronická verze),* ⟨http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_ekniha-001/pages-img/⟩ , VŠCHT v Praze, 2005.

[7] ŠEMBERA J., *Cvičebnice k předmětu Mechanika tekutin,* Technická univerzita v Liberci, Liberec, 2002.

[8] MATOUŠEK V., PICEK T., slidy k přednáškám předmětu Hydraulika 141HYA ⟨http://147.32.129.81/Hydraulika/Predmety/Hya/prednasky.htm⟩,ČVUT, 2008.

[9] NOŽIČKA J., *Mechanika tekutin,* Praha, Vydavatelství ČVUT, 2004.

[10] NOSKIEVIČ P., *Modelování a identifikace systémů,* Ostrava, Montanex a.s., 1999.

[11] FRANKLIN G. F., POWEL D. J., EMANI-NAEINI A., *Feedback Control of Dynamic Systems (Fifth Edition),* New Jersey, Editorship: Pearson Prentice Hall, 2006

[12] HORÁČEK P., *Systémy a modely,* Praha, Vydavetelství ČVUT, 1999.

[13] ROUBAL J., *Systémy a modely (Jirkovy stránky)* ⟨http://dce.felk.cvut.cz/roubal/⟩,

[14] ROUBAL J., HUŠEK P. A SPOL, *Základy regulační techniky,* 05/2008.

Přílohy

Obsah souboru s parametry – parametry.m

```
% Parametry zarizeni
clear all;

%% Obecne parametry
% gravitacni zrychleni (m.s^-2)
g = 9.81;

% pocet licich proudu (strand) (-)
N = 3;

% hustota zeleza pri teplote T = 1600°C (kg.m^-3)
ro = 7014;

% prevodni konstanta vypustneho ventilu panve
Kv = 0.00017;

% fi - rychlostni soucinitel (-)
% alfa - Coriolisuv soucinitel (Coriolisovo cislo) (-)
% ksi - ztratovy soucinitel (-)
% fi = 1/sqrt(alfa + ksi));

% mi - vytokovy soucinitel (-)
% alfa (pro odliseni epsilon) - soucinitel kontrakce (-)
% mi = epsilon*fi;


%% Panev
% valec - podstava Sp0, pocatecni vyska hp0

% pocatecni hmotnost zeleza v panvi (kg)
% hmotnost mensi o pocatecni hmotnost zeleza v nalevce
% regulace probiha v okoli pozadovane hodnoty
mp0 = 50000;

% polomer podstavy (m)
rp = 1;

% obsah podstavy (m^2)
Sp0 = pi*rp^2;


% pocatecni vyska zeleza v panvi (m)
hp0 = mp0/(Sp0*ro);

% polomer vypustneho ventilu (m)
rpout = 0.0275;
```

```
% minimalni obsah vypustneho ventilu (m^2)
Spoutmin = 0;

% maximalni obsah vypustneho ventilu (m^2)
Spoutmax = pi*rpout^2;

% obsah vypustneho ventilu (m^2)
Spout = 0.25*Spoutmax;

% ztraty a nelinearity (podrobneji vysvetleno v obecnych parametrech
alfap = 1;
ksip = 0;
epsilonp = 1;

fip = 1/(sqrt(alfap + ksip));
mip = epsilonp*fip;

%% Nalevka
% kvadr s obsahem podstavy Sn0, pocatecni vyska hn

% pocatecni hmotnost zeleza (kg)
mn0 = 3000;

% obsah podstavy (m^2)
Sn0 = 3.0;

% pocatecni vyska zeleza v panvi (m)
hn0 = mn0/(Sn0*ro);

% polomer vypustneho ventilu (m)
rnout = 0.009;

% obsah vsech vypustnych ventilu (m^2) (podle poctu pouzivanych strandu)
Snout = N*pi*rnout^2;

% ztraty a nelinearity (podrobneji vysvetleno v obecnych parametrech
alfan = 1;
ksin = 0;
epsilonn = 1;

fin = 1/(sqrt(alfan + ksin));
min = epsilonn*fin;

%% Forma
% kvadr s obsahem podstavy Sf, hrana podstavy af

% hrana podstavy (m)
af = 0.10;

% obsah podstavy (m^2)
Sf = N*af^2;

% ztraty a nelinearity (podrobneji vysvetleno v obecnych parametrech
alfaf = 1;
ksif = 0;
```

```
epsilonf = 1;

fif = 1/(sqrt(alfaf + ksif));

%% Pozadovane hodnoty

% pozadovana vyska hladiny zeleza v nalevce (m)
hnw = 3000/(Sn0*ro) + 0.05;
```